

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18592

研究課題名（和文）デコヒーレンスを活用した革新的量子技術の研究

研究課題名（英文）Research on decoherence and quantum technologies

研究代表者

大塚 朋廣（Otsuka, Tomohiro）

東北大学・材料科学高等研究所・准教授

研究者番号：50588019

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：量子状態が壊れてしまうデコヒーレンスは、現状の現実世界の量子系では避けることができず、量子系の活用の際に課題となっている。しかし、もしこのデコヒーレンスをうまく利用できれば、有用な量子技術の要素として活用できる可能性もある。そこで本研究では、操作性の良いデコヒーレンスを導入可能である半導体量子ドット系を用いて、デコヒーレンスに関連する現象について実験を行い、その物理解明を進めた。またこれを活用した量子技術についても研究を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、半導体量子ドット系におけるデコヒーレンスに関連する現象の物理解明や、新しい半導体量子系材料の可能性開拓、そしてこれらを活用した量子技術についての研究を進めることができた。これらの成果は、半導体量子ドット系を用いた新しい量子技術に貢献するものであり、量子コンピューティングや量子センシング分野での応用が期待される。また将来的な大規模量子計算等に向けた量子技術の発展にも貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：Decoherence, which induces the breakdown of quantum states, is currently unavoidable in realistic quantum systems and poses a challenge in utilizing quantum systems. However, if we can utilize this decoherence, it could potentially be used as a valuable component in quantum technology. In this study, we investigated decoherence using semiconductor quantum dot systems, in which we can induce controlled decoherence. We also explored quantum technologies that make use of this decoherence.

研究分野：ナノマイクロ科学

キーワード：量子ドット ナノ・マイクロデバイス デコヒーレンス 量子情報

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

量子力学的な状態を利用した量子コンピューティングや量子エレクトロニクスなどの量子技術は、新しいテクノロジーとして期待されており、研究が進められている。しかし、このような量子技術の実用において障害となるのがデコヒーレンスである。デコヒーレンスとは、量子系が外界と結合することにより量子状態が壊れてしまう現象のことで、これにより量子系が本来持つ優れた特性を維持することが難しくなる。現状の技術では、このデコヒーレンスを完全に避けることはできないため、量子系の活用の際に課題となっている。

しかし、逆にこのデコヒーレンスをうまく利用することができれば、これを制御することで新たな量子技術の一部として活用できる可能性がある。そのため、量子系のデコヒーレンスについてのミクロな物理解明や、デコヒーレンスを意図的に活用した新しい量子技術を研究することの重要性が高まっている。これらの研究により、デコヒーレンスの特性を有効に利用することで、量子技術のさらなる発展が期待される。

2. 研究の目的

そこで本研究では、現在研究が進む様々な人工的な量子系の中で操作性がよく、また操作可能なデコヒーレンスも導入することが可能であると考えられる半導体量子ドット系を用いて量子実験系を作製する。そしてこれを活用して、半導体量子ドット系におけるデコヒーレンスに関連する現象について測定を行い、その物理解明を進める。またこの過程で得られる知見を元に、デコヒーレンスによる量子状態遷移の変化や、量子センサ動作におけるその影響と改良等、将来の量子情報処理や量子センシングに向けて、デコヒーレンスを活用した新しい量子技術に関する研究を実施する。

3. 研究の方法

本研究では、半導体量子ドットを実験系として用いる。半導体量子ドットは、ナノスケールの微小領域に電子を閉じ込めた構造であり、その内部に閉じ込められた電子は量子閉じ込め効果により特定の量子状態を形成する。この量子閉じ込め効果とは、電子が閉じ込められることにより特定のエネルギー状態に制限される現象を指し、これにより独自の量子状態が生成される [1]。さらに、電極に印加する電圧などを操作することで、量子ドット内部の量子状態を制御することが可能である。そして、量子ドット内部の電子の量子状態は電気測定を通じて検出できる。この電気測定に高周波測定手法を用いることができ、これにより固体中の単一電子レベルでの高感度かつ高速な測定が可能となる [2,3]。

そこで本研究ではこのような特色を持つ半導体量子ドットを利用することにより、人工的に制御可能な量子実験系を作製する。そしてデコヒーレンスに関連する現象について、高感度な電気測定により測定を行い、そのミクロな物理解明を進める。さらに、ここで得られる知見を基に、シミュレーション等も利用しながら、デコヒーレンスを活用した量子技術についての研究を実施する。

4. 研究成果

半導体量子ドットを用いた人工量子系実験においては、先述のように人工量子準位の形成と電気測定手法によるその量子準位の高感度、高速測定が重要となる。そこでこれらの技術について開発、改良を実施した。まず、ガリウムヒ素などの半導体材料を用いて作製される二次元電子半導体基板に対して、電子線リソグラフィやフォトリソグラフィといった微細加工技術を活用し、微小な金属電極等の構造を作製した。これにより、電界制御型の半導体量子ドット試料を作製した。そして電極の配置や形状を調整することで、量子ドット閉じ込めポテンシャルを形成する電極形状等の最適化を行い、安定な量子ドットを形成できるようにした。

次に、この半導体量子ドット内部に形成される電子の量子状態を電気測定によって検出するために、測定系の整備および改良を行った。エネルギースケールの小さい量子状態を安定して測定するためには、温度ゆらぎを抑えた極低温環境での電気伝導測定が必要である。そこで、希釈冷凍機などの試料冷却装置を使用し、

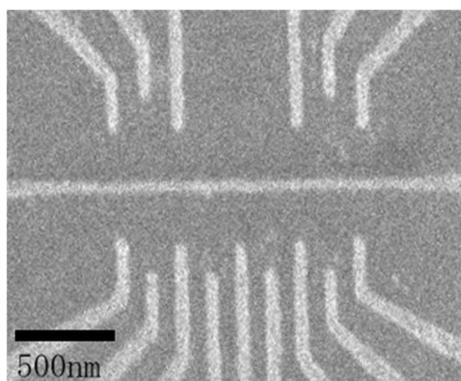


図1 半導体量子ドット試料の電子顕微鏡写真。半導体基板上に微細加工により微小電極等を形成して作製する。

低ノイズの電気測定が可能となるように測定配線やフィルタ回路の改良を実施した。また、高周波を活用した高速電気測定系についても整備し、半導体量子ドット内の電子状態を高速で制御するための高速電気制御系についても構築した。これにより、単一電子の検出やその制御が可能となり、本研究で必要とされる精密な測定と制御が実現した。

そして、作製した半導体量子ドット試料と測定セットアップを活用して、半導体量子ドット系における電子状態の測定およびデコヒーレンスに関連する現象の測定、解明を行った。半導体量子ドットを利用して量子ドット内に電子をトラップし、その電子の量子状態について量子ドットを透過する電流や、量子ドット近傍に設置した電荷センサを使って観測した。これにより量子ドット中に形成される量子準位について調べるとともに、トラップされた電子のスピンの基づく量子状態についても観測を行った。さらに、電子状態の電気的高速制御を組み合わせることで、半導体量子ドット内の電子スピン量子状態を制御し、量子状態のデコヒーレンス等を評価した。そして外部から導入する電気信号などのデコヒーレンスに関連するパラメータについて制御と評価を行った。

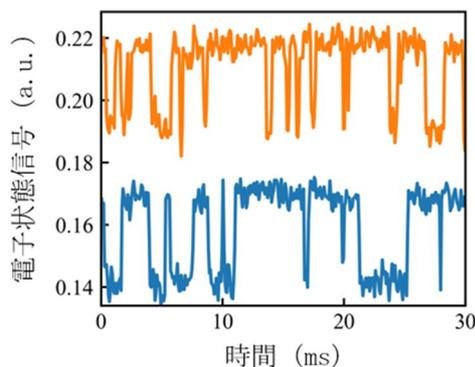


図2 高感度高周波電気測定により観測された半導体量子ドット中電子状態測定の一例。量子ドット中の単一電荷を検出できている。

そしてこれらの技術を活用することにより、半導体量子ドット内の電子状態遷移等について実験を行った。半導体量子ドット内の電子状態遷移について、その電子状態制御と組み合わせた精密電気測定を実施した。この測定結果を理論と比較することで、電子状態遷移に関わるミクロな物理現象を解明した。さらに半導体量子ドット系における電子状態遷移について、電子間の相互作用(電子相関)が影響を及ぼす場合についても、その測定と物理過程の解明を行った。また、これらの実験で開発した測定および制御系を活用して、半導体量子ドット系の新しい高速制御技術を実現した。具体的には、量子ビットの読み出しに重要な電荷状態センサのダイナミックレンジ(測定可能な範囲)を拡張する新機能を実現した [4]。

またデコヒーレンスに影響するパラメータには材料に依存するものがあるため、デコヒーレンスに関するパラメータの操作性の向上にむけて、新しい半導体量子ドット系材料についても取り組みを行った。半導体量子ドット試料を構成する材料中の核スピンや電荷ノイズ等は、電子、スピン量子状態のデコヒーレンスに影響する。このため新しい量子系材料の開拓は、デコヒーレンスの制御において興味深い課題である。そこで窒化ガリウムなどの新しい半導体材料を使用し、半導体量子ドットの形成方法やそのデバイス構造における依存性を明らかにした [5]。さらにグラフェン等の原子層材料も従来半導体材料と異なる特性を有するため、新しい量子系材料として興味深い材料である。これらの材料についても研究を行い、半導体量子デバイス応用で重要となる高周波測定手法の実現等に貢献した [6]。これらにより新しい材料について、デコヒーレンス特性の異なる新しい量子系材料としての評価を実施し、また新量子系材料としての可能性を見出すことができた。

そしてこれらの知見を活用して、デコヒーレンスを活用した量子状態操作等の量子技術についての研究を行った。デコヒーレンスを利用することにより電子状態遷移に変化を生じさせることが可能である。この変化について、量子状態のシミュレーションも併用しながら解析を行った。そしてこれを利用した量子状態遷移の促進について研究を行った。またこの過程を利用することにより、量子センシング時の量子状態変化にも応用することができ、量子センサ動作への活用等について検討を実施した。これらの成果は、半導体量子ドットを用いた新しい量子技術に貢献するものであり、量子コンピューティングや量子センシング分野での応用が期待される。また将来的な大規模量子計算等に向けた量子技術の発展にも貢献することが期待される。

<引用文献>

- [1] S. Tarucha, D. G. Austing, T. Honda, R. J. van der Hage, and L. P. Kouwenhoven, *Physical Review Letters* **77**, 3613 (1996).
- [2] D. J. Reilly, C. M. Marcus, M. P. Hanson, and A. C. Gossard, *Applied Physics Letters* **91**, 162101 (2007).
- [3] J. Yoneda et al., *Nature Nanotechnology* **13**, 102 (2018).
- [4] Y. Fujiwara, M. Shinozaki, K. Matsumura, K. Noro, R. Tataka, S. Sato, T. Kumasaka, and T. Otsuka, *Applied Physics Letters* **123**, 213502 (2023).

- [5] K. Matsumura, T. Abe, T. Kitada, T. Kumasaka, N. Ito, T. Tanaka, K. Nakahara, and T. Otsuka, *Applied Physics Express* **16**, 075003 (2023).
- [6] T. Johmen, M. Shinozaki, Y. Fujiwara, T. Aizawa, and T. Otsuka, *Physical Review Applied* **20**, 014035 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Muto Yui, Nakaso Takumi, Shinozaki Motoya, Aizawa Takumi, Kitada Takahito, Nakajima Takashi, Delbecq Matthieu R., Yoneda Jun, Takeda Kenta, Noiri Akito, Ludwig Arne, Wieck Andreas D., Tarucha Seigo, Kanemura Atsunori, Shiga Motoki, Otsuka Tomohiro	4. 巻 2
2. 論文標題 Visual explanations of machine learning model estimating charge states in quantum dots	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 APL Machine Learning	6. 最初と最後の頁 26110-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0193621	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 Fujiwara Yoshihiro, Shinozaki Motoya, Matsumura Kazuma, Noro Kosuke, Tataka Riku, Sato Shoichi, Kumasaka Takeshi, Otsuka Tomohiro	4. 巻 123
2. 論文標題 Wide dynamic range charge sensor operation by high-speed feedback control of radio-frequency reflectometry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 213502-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0167212	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 Johmen Tomoya, Shinozaki Motoya, Fujiwara Yoshihiro, Aizawa Takumi, Otsuka Tomohiro	4. 巻 20
2. 論文標題 Radio-Frequency Reflectometry in Bilayer Graphene Devices Utilizing Microscale Graphite Back-Gates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 14035-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.20.014035	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 Matsumura Kazuma, Abe Takaya, Kitada Takahito, Kumasaka Takeshi, Ito Norikazu, Tanaka Taketoshi, Nakahara Ken, Otsuka Tomohiro	4. 巻 16
2. 論文標題 Channel length dependence of the formation of quantum dots in GaN/AlGaIn FETs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 075003-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ace415	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 Shinozaki Motoya, Igarashi Junta, Iwakiri Shuichi, Kitada Takahito, Hayakawa Keisuke, Jinnai Butsurin, Otsuka Tomohiro, Fukami Shunsuke, Kobayashi Kensuke, Ohno Hideo	4. 巻 107
2. 論文標題 Nonlinear conductance in nanoscale CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions with perpendicular easy axis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094436-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.094436	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 Kato Toshiaki, Kitada Takahito, Seo Mizuki, Okita Wakana, Sato Naofumi, Shinozaki Motoya, Abe Takaya, Kumasaka Takeshi, Aizawa Takumi, Muto Yui, Kaneko Toshiro, Otsuka Tomohiro	4. 巻 3
2. 論文標題 Scalable fabrication of graphene nanoribbon quantum dot devices with stable orbital-level spacing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 103-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-022-00326-3	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12件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Tomohiro Otsuka
2. 発表標題 Semiconductor Qubits and New Materials
3. 学会等名 UK-Japan-Swiss Workshop 'Materials for Quantum Electronics' (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tomoya Johmen, Motoya Shinozaki, Yoshihiro Fujiwara, Takumi Aizawa, and Tomohiro Otsuka
2. 発表標題 High-frequency measurement in graphene nanostructures for quantum devices
3. 学会等名 Workshop on Quantum and Classical Cryogenic Devices, Circuits, and Systems, Superconducting SFQ VLSI Workshop, and International Workshop of Spin/Quantum Materials and Devices (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoya Johmen, Motoya Shinozaki, Yoshihiro Fujiwara, Riku Tataka, Takumi Aizawa, Takeshi Kumasaka, and Tomohiro Otsuka
2. 発表標題 Radio-frequency reflectometry measurement in bilayer graphene microdevices
3. 学会等名 International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiro Otsuka
2. 発表標題 Semiconductor spin qubits and new materials
3. 学会等名 Workshop: Emerging Platforms for Quantum Computing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松村和真、阿部峰也、篠崎基矢、相澤拓海、熊坂武志、大塚朋廣
2. 発表標題 GaN FETにおけるマイクロ波共鳴ピークの解析
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 篠崎基矢、藤原義弘、松村和真、野呂康介、田高陸、佐藤彰一、熊坂武志、大塚朋廣
2. 発表標題 高周波反射測定の高速PID制御による電荷センサのダイナミックレンジ改善
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松村和真、阿部峰也、北田孝仁、熊坂武志、伊藤範和、田中岳利、中原健、大塚朋廣
2. 発表標題 短チャネルGaN FETにおける少数量子ドットの形成
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiro Otsuka
2. 発表標題 Quantum dots in new materials for quantum devices
3. 学会等名 International Workshop of Spin/Quantum Materials and Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上面友也、篠崎基矢、熊坂武志、藤原義弘、田高陸、相澤拓海、大塚朋廣
2. 発表標題 二層グラフェン微小デバイスにおける高周波反射測定
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 相澤拓海、篠崎基矢、藤原義弘、熊坂武、中島峻、Matthieu R. Delbecq、米田淳、武田健太、野入亮人、Arne Ludwig、Andreas D. Wieck、樽茶清悟、大塚朋廣
2. 発表標題 高周波反射測定による量子ドットQCA状態電荷遷移の実時間観測
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Real-time measurement of QCA charge transition in quantum dots by rf-reflectometry
2. 発表標題 Takumi Aizawa, Motoya Shinozaki, Yoshihiro Fujiwara, Takeshi Kumasaka, Wataru Izumida, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Akito Noiri, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, Seigo Tarucha, and Tomohiro Otsuka
3. 学会等名 The 11th Workshop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Otsuka, Motoya Shinozaki, Yui Muto, Takahito Kitada, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Akito Noiri, Takumi Ito, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, and Seigo Tarucha
2. 発表標題 Noise analysis of radio-frequency reflectometry for single spin and charge detection in quantum dots
3. 学会等名 1st Online RIEC International Workshop on Spintronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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