

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13867

研究課題名（和文）横型量子ドットのゼロ磁場領域における少数スピン物理の研究

研究課題名（英文）Few-spin physics in lateral quantum dots in near-zero magnetic field regime

研究代表者

藤田 高史（Fujita, Takafumi）

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号：00809642

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、単一電子と単一成功を閉じ込める新しいデバイスを開発しました。これにより、電子と正孔を非常に近い距離で制御することが可能となり、新しい量子ドットデバイスが実現しました。光励起スピンを閉じ込めることでスピンの初期化を目指しており、新規デバイス構造の電磁界シミュレーションを重ね、また高精度な電極作製技術を確立しました。加えて、低磁場でのスピン操作を目指し、各基礎技術を実証しています。これらの成果により、将来的に目指す応用の実現が期待されます。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、学術的には新しい量子ドットデバイスを実現し、量子情報処理や通信の分野での応用が期待されます。従来、半導体中の量子情報キャリアは電子か正孔の片方のみの制御でしたが、本研究では両方のキャリアの制御や光との結合を目指し、磁場不要で高温での動作を目指しています。これにより、汎用性の高い複合的なデバイスの開発が促進され、情報技術やセキュリティー、ナノスケールのセンシングなど社旗への貢献が期待されます。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we have developed a new device that confines single electrons and single holes. This allows us to control electrons and holes at very close distances, leading to the realization of new quantum dot devices. We aim to initialize spins by confining optically excited spins, and have conducted electromagnetic field simulations of the device structures while establishing high-precision electrode fabrication techniques. Additionally, we are aiming for spin manipulation at low magnetic fields and have demonstrated each foundational technology. These achievements are expected to lead to the realization of the aimed applications.

研究分野：半導体量子ドット中の電子スピン

キーワード：量子ドット 量子情報処理 半導体 スピン制御 光励起

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

半導体量子ドットは、電荷とスピンの量子的な性質を利用し、量子ビットや多体スピン系のシミュレーションに応用されています。最近の研究では、III-V 族半導体における光学的選択則を利用した量子通信の研究も進展しています。また、極低温技術の進歩により、物性実験として低磁場領域ではスピン軌道相互作用によりスピン緩和時間が長くなり、核スピン磁場揺らぎに律速されることが報告されています。これにより、高次プロセスに担保されたスピンの保持時間の延長が期待されますが、未解明の領域も多く残されています。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ゼロ磁場領域における横型量子ドットの単一電子スピンの制御手法を開発し、長時間のスピン保持と熱耐性を持つ少数スピン状態の研究を行うことです。光学的な円偏光光子励起を使用した新しいスピン初期化技術や、スピンのコヒーレント制御・輸送技術を研究し、低磁場で安定する高次の量子状態実験を可能にし、トポロジカル量子計算や量子シミュレーションの要素技術に発展する基礎を築きます。

### 3. 研究の方法

本研究では、ゼロ磁場領域でのスピン制御を目指し、光励起スピン初期化や単一スピン操作などの手法を開発します。特に、光学的な円偏光光子励起を利用したスピン初期化は、横型量子ドットの新たな制御手法を提供し、その特徴的な応用として低磁場領域での安定なスピン初期化への利用を目指します。さらに、パルス波形の変調によるスピン操作の高速安定化や、パウリの排他律を利用したスピンパリティ測定による揺らぎ下で観測可能な、独自の緩和時間測定を活用します。これらの技術は GaAs 電子系やホール系での実現が期待され、特にホール系では高いスピン数のエネルギー的な安定が見込まれています。そのため、将来的な研究の基礎として知見を収集します。また、微小磁石の磁場を利用した局所的な制御、測定も検討し、電気的に制御が可能な範囲で部分的な原理実証を目指します。

### 4. 研究成果

本研究では、まず GaAs をベースにした非ドープ量子井戸ヘテロ構造を基盤として、歩留まりの良い作成手法を開発しました。この非ドープ構造は、極低温中の光照射でも安定性を発揮し、ドープ構造では昇温の必要があるために実現されなかった、低次元系の光学応用につながる可能性があります。ただし、最も基本的なオーミックコンタクトの歩留まりの良い方法が未確立です。その中で、独自にコンタクトの歩留まりを上げる手法を取って、応用デバイスの開発に着手しました(図1) [1]。この斜め蒸着法を利用して歩留まりを上げる効果を得ながら、その発展として誘起電圧の再現性を向上するための橋渡しの電極についても開発が進んでいます。これにより、次に続く量子ドット形成のための低電子密度の電圧制御が実現します。

デバイスの設計のために電磁界シミュレーションを行い、適切なポテンシャルが形成されていることを大まかに確認しました。そのうち、シュレーディンガー方程式を解くことで、電子と正孔の両キャリアの波動関数を独立に計算しました。その結果、各キャリアが適切に単一電荷のレベルまで閉じ込められ、0次元のキャリア伝道を観測できる設計が確認されました(図2)。

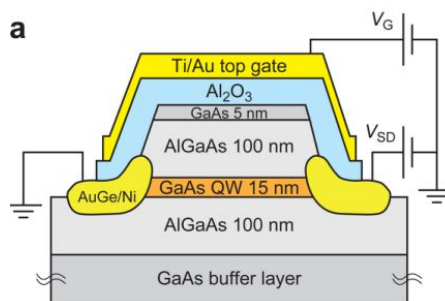


図 1

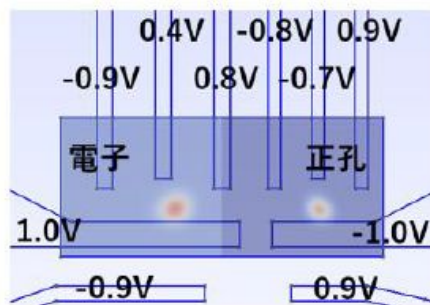


図 2

また、異なる既存のデバイス設計で作成した非ドープ型量子ドットデバイスでは、光照射による単一電荷検出や、スピン測定による基板評価が行われました。これらの希釈冷凍機温度での実験により、単一光子吸収の実時間観測実験で、us 単位の高解像度検出と時間単位の連続的な安定性が実証され、昇温サイクルを必要とせず極低温のまま連続的にスピン測定を行える可能性が確認されました(図3)。

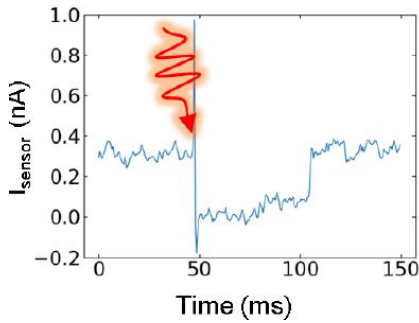


図 3

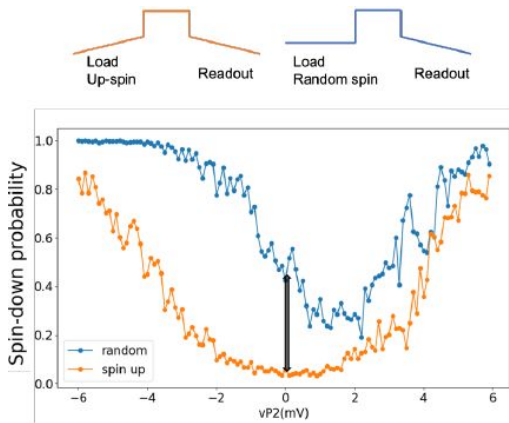


図 5

で、研究計画のバックアップとして含めていた微小磁石方式によるスピン制御を試みたところ、スピニコヒーレンスに大きな影響を与えずに、長いコヒーレンス時間を保ちつつ、スピン検出精度を向上させることができました。

計画外の成果として、文献[2]に示される、操作中のポテンシャル掃引に共通する物理に着目し、スピン制御に関する新たな知見を実証しました。この成果により、雑音が多い環境下で特に有用な手法として、断熱定理を応用した数理的な解法を示しただけでなく、雑音環境を支配する物理を理解することで、さらに最適化を施す手順を提案するに至りました。この成果は主たる成果として発表されることになりました。

以上の研究により、低磁場下でのスピン初期化、操作、測定に関する基礎技術の実証に成功しました。特に、低磁場環境での長時間スピン保持技術を確認したことは、量子計算応用に向けた重要な進展です。本研究の進展により、低磁場下でのスピン物理の解明が進み、将来的に高温動作可能な量子デバイスの実現にも寄与することを期待しています。今後は、これまでに得られた歩留まりや制御手法の知見を基に、さらにデバイスの最適化に注力し、応用研究への道を拓いていきます。

#### 参考文献

- [1] T. Fujita et al., *J. Appl. Phys.* **129**, 234301 (2021).
- [2] X-F Liu et al., *Phys. Rev. Lett.* **132**, 027002 (2024).

次の段階として目指す光照射実験は、特定の円偏光照射により安定したスピンを初期化を行うことです。半導体の光吸収エネルギーは、バンドギャップの大きさに決まるため、スピンの磁場分裂に比べて桁違いにエネルギーが大きく、角運動量転写の原理を応用して安定したスピンの初期化が期待されます。ただし、極低温への照射には様々な困難があり、冷凍機へのファイバー導入と、デバイス開発が進められました。基板に対応する近赤外のレーザー光導入に加えて、マイクロ波によるスピン制御を実現するために、真空装置の中への同軸線やファイバー系を同時に導入し、ナノデバイスへの接続と照射を可能にする必要があります。そのための制御線や増幅器、基板支持部品等を製造しました(図4)。これらの構成により、冷凍機温度の上昇を抑えつつ、集光された照射と完全なスピン制御実験が可能なセットアップが開発されました。

続いて、スピン制御に関する実証について、相対的に高温動作(低磁場領域)の環境下でスピン測定が可能かを検証しました。そのために、実時間スピン検出中にポテンシャルを掃引し続ける手法を用い、スピン検出精度の向上を確認し、熱雑音に埋もれて検出されない状況から原理検証に十分な測定精度の獲得に成功しました(図5)。さらに、同じ環境下



図 4

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Matsumoto Yuta, Fujita Takafumi, Ludwig Arne, Wieck Andreas D., Komatani Kazunori, Oiwa Akira	4. 巻 7
2. 論文標題 Noise-robust classification of single-shot electron spin readouts using a deep neural network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	6. 最初と最後の頁 136
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41534-021-00470-7	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

1. 著者名 Fujita Takafumi, Hayashi Ryota, Kohda Makoto, Ritzmann Julian, Ludwig Arne, Nitta Junsaku, Wieck Andreas D., Oiwa Akira	4. 巻 129
2. 論文標題 Distinguishing persistent effects in an undoped GaAs/AlGaAs quantum well by top-gate-dependent illumination	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 234301 ~ 234301
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0047558	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

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 2件/うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Y. Matsumoto, T. Fujita, A. Ludwig, A.D. Wieck, K.Koike,T.Miyoshi, and A. Oiwa
2. 発表標題 Fast single-spin qubit operation and its coherence time enhanced by feedback control
3. 学会等名 International Conference on the Physics of Semiconductors 30th（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Matsumoto, T. Fujita, A. Ludwig, A.D. Wieck, K.Koike,T.Miyoshi, and A. Oiwa
2. 発表標題 Fast single-spin qubit operation and its coherence time enhanced by feedback control
3. 学会等名 Spin qubit 5（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Fujita
2. 発表標題 Coherently coupling single-spins in semiconductor quantum dots
3. 学会等名 11th imec Handai International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本雄太, 藤田高史, X.Liu, A.Ludwig, A.D.Wieck, 小池啓介, 三好健文, 大岩顕
2. 発表標題 多重量子ドットにおける高速高忠実度スピン操作
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤田 高史
2. 発表標題 スピン量子ビットのための量子ドット多重化とスピン伝送
3. 学会等名 Spin-RNJ Symposium 2022
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤田 高史
2. 発表標題 量子ドット列中のスピン輸送を応用した量子情報読み出し・操作・伝送
3. 学会等名 スピン学際年次報告会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 湯田 秀明、藤田 高史、大岩 顕
2. 発表標題 量子ドット列を介したスピン量子ビットの断熱量子状態転送
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 Xial-Fei Liu、松本雄太、藤田 高史、木山治樹、J.Ritzmann A、A.Ludwig A、A.D.Wieck A、大岩顕
2. 発表標題 高周波のパルス変調を用いた電子スピン量子ビットの断熱反転操作高速化
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takafumi Fujita, Satoshi Yanagidani, Genki Fukuda Julian Ritzmann, Arne Ludwig, Akira Oiwa
2. 発表標題 Optical emission from a lateral p-i-n junction formed in an un doped GaAs/AlGaAs quantum well
3. 学会等名 Joint Conference: 24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Fukuda, R. Hayashi, T. Fujita, M. Kohda, J. Ritzmann, A. Ludwig, J. Nitta, A. D Wieck, A. Oiwa
2. 発表標題 Illumination Effects on Gate-defined GaAs Quantum Dots in an Undoped Quantum Well
3. 学会等名 Joint Conference: 24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Matsumoto, T. Fujita, A. Ludwig, A. D. Wieck, and A. Oiwa
2. 発表標題 Fast singlet-triplet readout using a deep neural network
3. 学会等名 Joint Conference: 24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本雄太, 藤田高史, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, 大岩顕
2. 発表標題 深層学習手法を用いた量子ドット内電子スピン状態の高精度検出
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takafumi Fujita
2. 発表標題 Linking spin qubits in quantum-dot arrays
3. 学会等名 36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takafumi Fujita
2. 発表標題 Networking spin qubits in multi-scale
3. 学会等名 12th Imec-Handai International Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023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1件

国際研究集会 Silicon Quantum Electronics Workshop 2023 (SiQEW2023)	開催年 2023年 ~ 2023年
---	----------------------

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			
ドイツ	Ruhr Universitat Bochum			
ドイツ	ルール大学ボーフム			
カナダ	National Research Council Canada			