

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 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：18K14079

研究課題名(和文)半導体量子ドット電子スピンの完全ベル測定へ向けた研究

研究課題名(英文) Study towards complete Bell state measurement of semiconductor electron spin qubits

研究代表者

木山 治樹 (Kiyama, Haruki)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：80749515

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)：GaAs量子ドット電子スピンの完全ベル測定の実現を目指し、その基盤技術として多値スピン読み出しに取り組んだ。試料作製が難航し、多値スピン読み出しの達成までは至らなかったが、高忠実度の単一スピン読み出しなどの構成要素技術を確認した。また、スピン閉塞効果を用いたスピン三重項とスピン三重項の判別手法について、従来のスピン-電荷変換および電荷状態変換による高忠実度化に加え、スピン励起状態の準安定化による更なる読み出し精度向上手法を提案し、その実証実験に成功した。さらにInAs自己形成量子ドットを用いて並列2重単一電子トランジスタを作製し、自己形成量子ドットでの単一電荷検出に世界で初めて成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通信に適した光子量子ビットとの親和性の高いIII-V族量子ドットにおいて、電子スピン量子ビットの完全ベル測定を実現することは、量子ドットを量子中継器として用いた長距離量子通信の実現に重要である。本研究ではその基盤技術である多値スピン読み出しに向けて構成要素技術を確認した点に意義がある。また、スピン閉塞効果を用いたスピン読み出しの精度向上手法は、量子計算においても有用であると期待される。また、InAs量子ドットは強いスピン軌道相互作用による高速スピン操作や、光子との高効率結合が期待されており、単一電荷検出の成功は光-スピン量子インターフェースへの進展が期待される重要な成果である。

研究成果の概要(英文)：I worked on multi-valued readout of two-electron spin states in GaAs gate-defined quantum dots towards complete Bell state measurements. Though the multi-valued readout was not realized due to troubles in device fabrication, I successfully demonstrated the ingredients of the multi-valued readout such as high-fidelity binary spin readout. Moreover, I conceived and demonstrated a scheme to improve the fidelity of single-shot spin readout based on Pauli spin blockade. In addition to the latching mechanism that has been already reported, I applied a voltage pulse that makes the excited spin state to a metastable one, which suppresses the readout error due to spin relaxation. I also achieved the single-electron charge sensing of InAs self-assembled quantum dots, which is the first step towards fast spin manipulation using strong spin-orbit interaction and an efficient photon-spin quantum interface.

研究分野：半導体電子物性

キーワード：量子ドット 単一スピン計測 単一電荷計測

## 1. 研究開始当初の背景

ベル測定とは、二つの単一量子状態(量子情報における量子ビット)対の量子もつれ状態基底(ベル基底)への射影測定であり、量子テレポーテーションや量子もつれ交換に必要な不可欠な測定技術である。特に量子もつれ交換は、長距離量子通信を可能とする量子中継の必須要素であり、これを制御性の高い固体量子ビットで実現することは喫緊の課題となっている。

固体量子ビットにおける完全ベル測定は、ダイヤモンド中の NV センターや超伝導量子ビットですでに実現されており、量子テレポーテーションなどが報告されている。しかし、半導体量子ドット中の電子スピン量子ビットは集積性や制御性の点で優れており、また適切な半導体材料を用いることで通信波長帯の光子に対する量子中継といった利点が期待される。量子ドットを用いた量子中継へにおける技術的課題の一つが、二電子スピンのベル測定である。GaAs 量子ドットでは、スピン一重項を判別する部分ベル測定が実現されている。

## 2. 研究の目的

本研究では半導体量子ドットにおける二電子スピン状態の完全ベル測定手法に向けて、その要素技術である多値スピン読み出し手法の確立を目的とする。GaAs ゲート制御量子ドットにおいて、二電子スピンの4つの固有状態全て(すなわちスピン一重項と3つのスピン三重項)のシングルショット読み出しを行う。多準位スピン状態間の緩和ダイナミクスの解明や、読み出しの高忠実度化を図る。その後、単一電子スピン共鳴による単一スピン操作を用いてベル状態をスピン固有状態に変換し、それに多値スピン読み出しを適用することで、部分ベル測定の拡張を目指す。

## 3. 研究の方法

GaAs/AlGaAs 高移動度 2 次元電子基板を微細加工し、ゲート制御量子ドットを作製する。量子ドット近傍に電荷検出用の別の量子ドットも作製する。希釈冷凍機を用いて、温度 10mK 程度の極低温下でスピン読み出し実験を行う。電圧パルスを手動でゲート電極に印加し、電気的ポンプ-プローブ法により、2 電子スピン状態をランダムに生成し、そのスピン状態を読み出す。既存の 2 値スピン読み出しを 3 回適用することで、4 種類の 2 電子スピン状態を判別する。

## 4. 研究成果

作製した量子ドット試料の電子顕微鏡写真を図 1 に示す。研究実施中に多値スピン読み出し手法を見直し、スピン閉塞効果を利用した 2 値スピン読み出しの利用を着想した。さらに 4 重量子ドットを用いた高忠実度化の手法を提案し、そのための量子ドット電荷計を備えた 4 重量子ドットを作製した。

図 2 に、作製した 4 重量子ドット試料で測定した電荷状態安定図を示す。細い線は量子ドットの電子数変化を表しており、傾きが異なる線が 4 本観測されたため 4 重量子ドットとしての動作が確認できている。また、さらに負電圧を印加しても電子数変化は確認できなかったため、各ドットの電子数を 0 から数個の範囲で調整できている。しかし、ドット間のトンネル結合の調整を試みたが、近傍の不純物の影響のためか中央(図 1 中 B3 付近)のトンネル結合の変調が困難であった。そこで、スピン読み出し手法を再検討し、試料を 2 重量子ドットとして用いて、多値スピン読み出しの実施に移行した。

図 3 に、2 重量子ドットの電荷状態安定図を示す。図中の括弧は(ドット 1 の電子数、ドット 2 の電子数)を示す。ドット 1 の電子数変化の線がぼやけているが、多値スピン読み出しで用いるゼーマン分裂スピン読み出しのために、ドット 1 と 2 次元電子のトンネルレートを小さく調整しているためである。

スピン一重項 スピン三重項読み出し実験では、点 R で(0,2)状態に初期化した後、点 I で(1,1)のスピン一重項とスピン三重項の混合状態を生成する。その後点 P でスピン状態に依存して(1,1)あるいは(0,2)状態に変換する。これが従来の読み出し方法である。ドット 2 と 2 次元電子のトンネルレートがスピン緩和レート

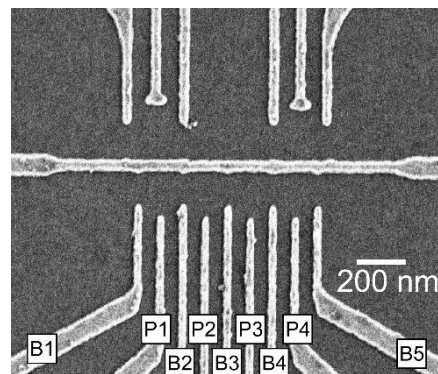


図 1 . GaAs 4 重量子ドット試料の電子顕微鏡写真。

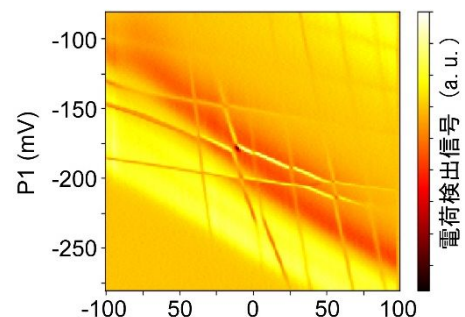


図 2 . GaAs 4 重量子ドットの電荷状態安定図。

( $\sim 100\text{kHz}$ )に比べて十分大きい場合、スピンの緩和する前に点 L1 に移動すると、(0,2)状態に変換されていた場合のみ、(0,1)状態にさらに変換される。つまり、スピン状態に依存して(1,1)あるいは(0,1)状態が生成される。この電荷状態変換は電荷検出信号を増強するため、電荷検出ノイズ由来のスピン読み出しのエラーを低減することが報告されている[Phys.Rev.X 8 021046(2018)]。しかし、スピン緩和によるエラーは変わらず、スピン緩和が比較的速い III-V 族量子ドットではこの要因によって忠実度が制限される。

そこで、本研究ではさらに点 L2 に移動することにより、スピン緩和後も(1,1)状態から(0,2)状態への遷移が抑制されるため、スピン緩和によるエラーの低減が可能であることに着想した。図4に、上述の各地点での読み出し信号の時間発展を示す。黒線が従来の読み出し手法によるものであり、時間ゼロで測定開始後わずかに信号が増加しているが、これはスピン三重項からスピン一重項への緩和を示している。図4は1000回の測定を平均化したものであり、シングルショットで判別する際には信号強度が小さいためにエラーが大きくなる。赤線は点 L1 で電荷状態変換した場合の信号であり、信号強度(緩和前と緩和後の信号差)が著しく増強されている。青線は、さらに点 L2 でスピン励起状態を準安定化した時の信号であり、信号強度の増強に加えて緩和時間を10倍程度延長させることに成功した。

本研究ではGaAs ゲート制御量子ドットに加えて、InAs 自己形成量子ドットにも着目した。InAs 量子ドットは強いスピン軌道相互作用を用いた高速スピン操作や光子との高効率な結合が期待され、量子情報分野への応用も期待されている。本研究では単一スピン操作・読み出しに向けた基盤技術として、単一電荷検出に取り組んだ。

GaAs 基板の上に Stranski-Krastanov モードで成長した InAs 自己形成量子ドットの中から、直径100nm程度で中心間距離が150nm程度離れた二つのドットを選び出し、各ドットにソース・ドレイン電極およびゲート電極を作製した(図5)。2つの量子ドット間の距離が短いために大きな静電結合が期待され、またソースドレイン電極幅を従来より小さくしたため遮蔽効果の低減が期待される。希釈冷凍機を用いて電子温度280mKで電気伝導測定を行ったところ、一方のドット(QD2)の電子数変化に伴い、他方のドット(QD1)の電気化学ポテンシャルの変調が観測された。これはQD1を電荷計として用いることで、QD2の電荷検出に成功したことを意味する。また、ドットとソース・ドレイン電極のトンネル結合が小さい条件において、単一電子トンネリングの実時間検出に成功した(図6)。

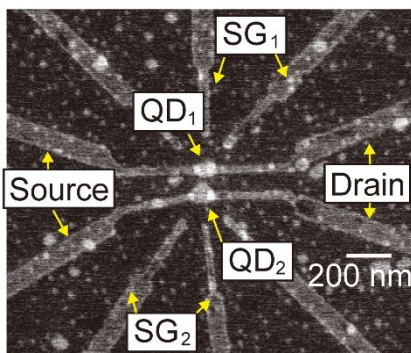


図5 .InAs 自己形成量子ドットを用いた並列2重単一電子トランジスタ試料の電子顕微鏡写真。

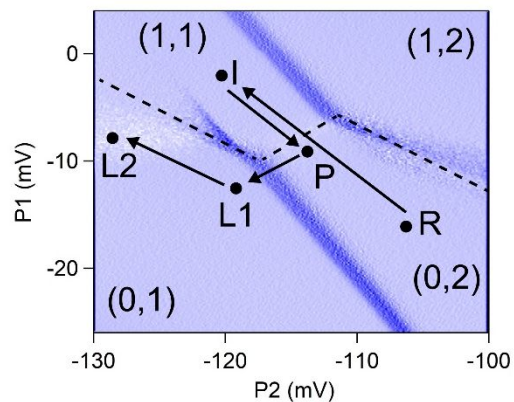


図3 . GaAs 2重量子ドットの電荷状態安定図およびスピン読み出し手法。

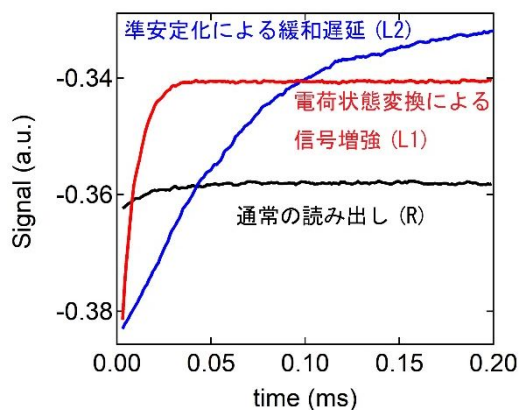


図4 . スピン三重項-スピン一重項読み出しにおける信号強度および緩和の比較。

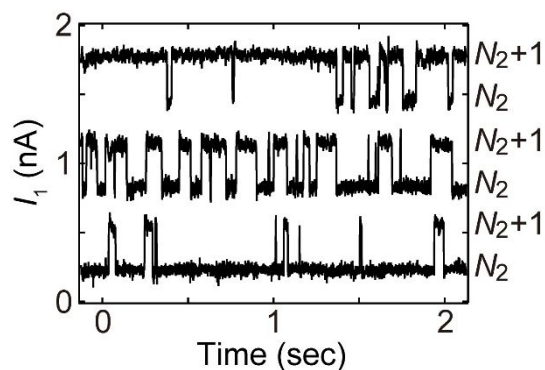


図6 .InAs 自己形成量子ドットの単一電子トンネリングの実時間検出信号。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Haruki Kiyama, Alexander Korsch, Naomi Nagai, Yasushi Kanai, Kazuhiko Matsumoto, Kazuhiko Hirakawa, Akira Oiwa	4. 巻 8
2. 論文標題 Single-electron charge sensing in self-assembled quantum dots	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13188-1-13188-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-018-31268-x	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 大岩顕, 藤田高史, 木山治樹, 黒山和幸, 松尾貞茂, 樽茶清悟	4. 巻 47
2. 論文標題 ポアンカレインターフェース - 単一光子偏光から単一電子スピンへの量子インターフェース -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 148-154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 T. Fujita, K. Morimoto, H. Kiyama, G. Allison, M. Larsson, A. Ludwig, S. R. Valentin, A. D. Wieck, Akira Oiwa, and S. Tarucha	4. 巻 10
2. 論文標題 Angular momentum transfer from photon polarization to an electron spin in a gate-defined quantum dot	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2991-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1038/s41467-019-10939-x">https://doi.org/10.1038/s41467-019-10939-x</a>	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 T. Tajiri, Y. Sakai, K. Kuruma, S. M. Ji, H. Kiyama, A. Oiwa, J. Ritzmann, A. Ludwig, A. D. Wieck, Y. Ota, Y. Arakawa, and S. Iwamoto	4. 巻 59
2. 論文標題 Fabrication and optical characterization of photonic crystal nanocavities with electrodes for gate-defined quantum dots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SGG105-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab5b62">https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab5b62</a>	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 1件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 酒井裕司, 田尻武義, 車一宏, 木山治樹, 大岩顕, 中島峻, 樽茶清悟, 岩本敏, 荒川泰彦
2. 発表標題 ゲート制御量子ドットを含む2次元スラブ型フォトニック結晶の光学・電気的特性の研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉見一慶, 加藤岳生, 木山治樹, 大岩顕
2. 発表標題 量子格子模型ソルバーH を用いた量子ドット系のスピン緩和率解析ツールの開発
3. 学会等名 日本物理学会2019年春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中萌, 川口紀俊, 木山治樹, Mario Bamesreiter, Dominique Bougeard, 大岩顕
2. 発表標題 SiGe自己形成量子ドットの電気伝導に対するサイドゲート効果
3. 学会等名 日本物理学会2019年春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Nakagawa, R. Fukai, Y. Sakai, T. Fujita, H. Kiyama, T. Nakajima, J. Ritzmann, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, and A. Oiwa
2. 発表標題 Transport through quantum dots formed in a (110) GaAs quantum well
3. 学会等名 4th School and Conference on Spin-Based Quantum Information Processing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Tanaka, K. Kawaguchi, H. Kiyama, M. Bamesreiter, D. Bougeard, A. Oiwa
2. 発表標題 Fabrications and transport properties of SiGe self-assembled quantum dots
3. 学会等名 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haruki Kiyama, Alexander Korsch, Naomi Nagai, Yasushi Kanai, Kazuhiko Matsumoto, Kazuhiko Hirakawa, Akira Oiwa
2. 発表標題 Single-electron charge sensing in self-assembled quantum dots
3. 学会等名 34th International conference on the physics of semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Oiwa, S. Matsuo, K. Kuroyama, C. Y. Chung, R. Fukai, T. Nakagawa, T. Fujita, H. Kiyama, T. Tajiri, S. Iwamoto, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha
2. 発表標題 Conversion of angular momentum, quantum state and entanglement from photons to electron spin using gate-defined quantum dots
3. 学会等名 New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 深井利央, 酒井裕司, 中川智裕, 藤田高史, 木山治樹, Arne Ludwig, Andreas Dirk Wieck, 大岩顕
2. 発表標題 横型量子ドット上に作製した表面プラズモンアンテナの特性評価横型量子ドット上に作製した表面プラズモンアンテナの特性評価
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 井手西広樹, 木山治樹, 長井奈緒美, 平川一彦, 大岩顕
2. 発表標題 並列2重InAs自己形成量子ドットトランジスタの作製とその電気伝導特性
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 H. Kiyama, K. Yoshimi, T. Kato, T. Nakajima, A. Oiwa, and S. Tarucha
2. 発表標題 Measurement of multielectron high-spin states and its spin relaxation in a GaAs quantum dot
3. 学会等名 New Perspective in Spin Conversion Science (NPSCS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Genki FUKUDA, Ryota HAYASHI, Takafumi FUJITA, Yasushi KANAI, Makoto KOHDA, Haruki KIYAMA, Julian RITZMANN, Arne LUDWIG, Kazuhiko MATSUMOTO, Junsaku NITTA, Andreas D. WIECK, and Akira OIWA
2. 発表標題 Study of the undoped GaAs/AlGaAs mesoscopic structures toward a photon-spin quantum interface utilizing gate-defined quantum dots
3. 学会等名 The 23rd SANKEN International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroki Idenishi, Haruki Kiyama, Naomi Nagai, Kazuhiko Hirakawa, Akira Oiwa
2. 発表標題 Fabrication and characterization of InAs self-assembled parallel double quantum dots transistor
3. 学会等名 The 23rd SANKEN International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Tajiri, K. Kuruma, Y. Sakai, H. Kiyama, A. Oiwa, J. Ritzmann, A. Ludwig, A.D. Wieck, Y. Ota, Y. Arakawa, S. Iwamoto
2. 発表標題 Fabrication and Optical Characterization of Photonic Crystal Nanocavities with Electrodes for Gate-Defined Quantum Dots
3. 学会等名 52th International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉見一慶, 木山治樹, 大岩顕, 加藤岳生
2. 発表標題 量子ドット系でのスピン緩和率における電子相関効果の検証
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

半導体ナノサイズトランジスタへ電子1個が出入りする様子をキャッチ <a href="https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/toppage/hot_topics/topics_20180919/">https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/toppage/hot_topics/topics_20180919/</a>
---

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