

研 究 報 告 書

「機能性固体微細材料のマイクロレベル電子物性解析基盤技術の構築」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 大塚 朋廣

1. 研究のねらい

近年、エネルギー、環境問題に伴う省エネルギー化の推進や、情報化社会の進展による情報処理能力の強化のため、スピントロニクスや量子エレクトロニクス等の革新デバイス、革新エレクトロニクスを創出して、電子デバイスの超低消費電力化、情報処理能力の向上といった性能の飛躍的進歩を実現する社会的重要性が増している。この革新デバイス、革新エレクトロニクスにおいては、従来にも増して固体微細材料中の局所電子状態が本質的に重要な役割を果たすため、固体微細材料中でのミクロな電子物性を直接的に測定し、その物理現象を解明することが重要となる。

固体微細材料の評価を行う上で、電子物性に直接アクセスできる電子輸送測定は有効なツールの一つであり、さらに固体微細材料内部に生じる局所電子状態に直接的にアクセスできるミクロなプローブが有用である。本研究者はこれまで半導体量子ドット等を用いた局所電子状態プローブを開発してきた。この手法では測定対象からプローブ量子ドット内人工量子準位への電子のトンネル等を解析することにより、測定対象内の局所電子状態を調べることができる。そこで本研究では固体微細材料中の局所電子状態に直接アクセスできる独自のマイクロプローブによる分析手法を、固体微細材料内電子状態のシミュレーション等の理論、測定データを効率的に活用するデータ科学と融合させ、機能性固体微細材料のマイクロレベルからの電子物性解析基盤技術の構築を行う。これにより固体微細材料内での電子物性分析精密化、ミクロな物理現象の解明等を進め、機能性固体微細材料、デバイスの開発を効率的に進めるための基盤技術を開発する。

2. 研究成果

(1) 概要

固体微細材料中局所電子状態についてのマイクロプローブによる測定手法を、電子状態のシミュレーション等の理論、データを効率的に活用するデータ科学手法と融合させて、機能性固体材料のマイクロレベルからの電子物性を調べる基盤技術の構築を行った。本研究では大きく分けて2つの研究項目として、「マイクロプローブ測定と電子状態シミュレーションの融合による機能性固体微細材料の基礎物理解明手法の開発」、「マイクロプローブとデータ科学の融合による新ダイナミクス測定手法、及び機能性固体微細材料のダイナミクス解析基盤技術の開発」を実施した。

第一の研究項目では固体微細材料として半導体量子ドットと電極が結合した固体微細構造を測定ターゲットとして、半導体量子ドットを用いたマイクロプローブを活用して、局所電子・スピン状態を単一電子のレベルで測定した。そしてトンネル過程を取り入れたミクロな理論、シミュレーションの結果と比較することにより、その物理過程を解明した。

第二の研究項目ではマイクロプローブからのデータ解析にデータ科学手法を取り入れた。ベイズ確率を活用した解析手法について開発し、高精度な状態推定を行った。またマイクロプローブ試料等の微細構造試料制御についても、機械学習を用いた手法について研究を行い、固体微細構造試料において重要となる微小電極電圧による静電ポテンシャル形成の最適化に機械学習を適用した。

(2) 詳細

研究テーマ A: マイクロプローブ測定と電子状態シミュレーションの融合による機能性固体微細材料の基礎物理解明手法の開発

固体微細材料を用いて有用なデバイスを創製していくためには、その内部の局所電子状態をマイクロに観測し、その物理現象を解明することが重要である。本研究者はこれまで半導体量子ドット等を用いて微細材料中の電子状態を局所的($\sim 10\text{nm}$)に、高精度($\sim 10\mu\text{eV}$)かつ低擾乱($\sim 100\text{aA}$)に測定できる独自のマイクロプローブを開発してきた。本研究ではこのマイクロプローブ測定を局所電子状態のマイクロな理論、シミュレーションと組み合わせて固体微細材料中の物理現象を解明した。まず半導体量子ドットを用いたマイクロプローブ試料について、半導体微細加工技術を用いて作製した。またマイクロプローブの測定について、熱雑音を低減した低温下で高精度にかつデータ科学的処理に使える大量のデータを短時間で取得するために、低温冷凍機内で高周波を活用した高周波反射測定(\sim 数 100MHz)を行う測定系を構築、改良した。これらの測定セットアップを用いて、半導体量子ドットと電極が結合した固体微細構造における、局所電子・スピン状態を測定した。この結果、局所電子の電荷・スピン状態の時間変化を単一電子のレベルで測定することに成功した。

この測定結果について、トンネル過程を取り入れたマイクロな理論、シミュレーションを実施して比較を行った。この結果、単一電子トンネル過程における電荷とスピン状態の時間変化の差異、高次のトンネル過程によるスピン状態変化等の新現象について、その物理過程をマイクロに解明した。これらの成果は、固体微細材料中の局所電子状態解明の基礎物理で重要であるとともに、スピン量子ビット等における状態初期化や、スピン状態操作等に活用できるため、単一電子状態を活用したスピントロニクスや量子エレクトロニクス応用等に向けても有用である。またここで実証したマイクロプローブによる局所的な電子物性測定手法は、従来からの半導体微細材料だけでなく、近年注目を集めている原子層材料やトポロジカル材料等、他の固体微細材料測定にも応用可能である。

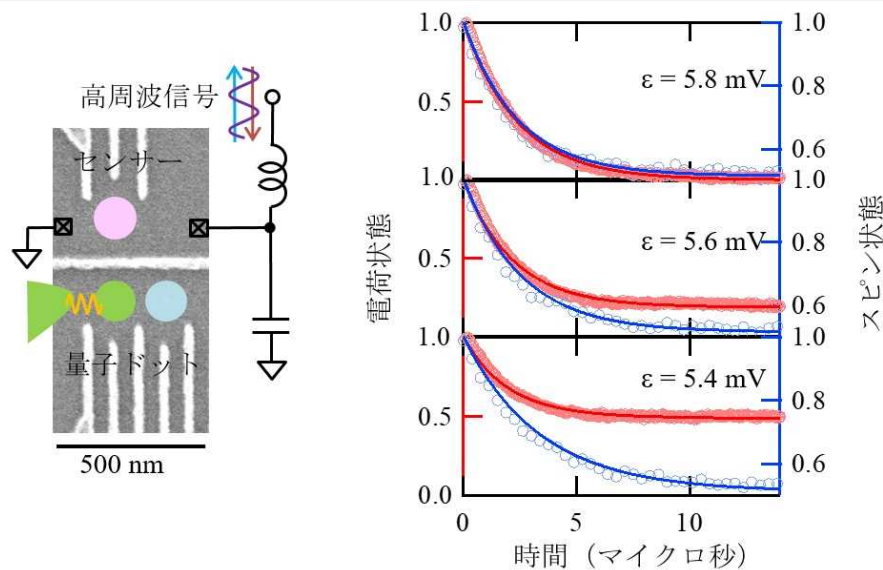


図1 ミクロプローブの電子顕微鏡写真と、ミクロプローブを用いた固体微細材料中の単一電子電荷・スピン状態の観測。

研究テーマ B:ミクロプローブとデータ科学の融合による新ダイナミクス測定手法、及び機能性固体微細材料のダイナミクス解析基盤技術の開発

高周波技術を活用したミクロプローブの高速化によって、短時間で大量のデータ取得が可能となり(1秒間に～1億データ)、その解析にデータ科学手法を活用できる状況が整ってきた。本研究ではこのミクロプローブからのデータ解析にデータ科学手法を活用する研究を行った。ミクロプローブ測定では測定対象の電子状態を、プローブ量子ドット内の単一電荷の有無から解析する。この単一電荷の有無について、実験では避けることのできないノイズのある実測定データから推定を行うのであるが、本研究ではこの推定にベイズ確率を活用した手法を開発した。この新手法では従来の解析では十分に活用されていなかった実時間のすべての測定データを活用することができ、より高精度な状態推定を実現できる。この動作をシミュレーションおよび実験データを用いて調べた。またこのベイズ手法による解析をミクロプローブ測定と同時にリアルタイムで実行するために、高速なロジックゲート処理を実現できる FPGA による信号解析回路を開発した。

また機械学習を用いたミクロプローブ試料制御についても研究を実施した。ミクロプローブ試料等の半導体微細構造試料では、複数の微小電極電圧により形成される半導体微細構造内の静電ポテンシャルが電子機能を創成する。この静電ポテンシャルの最適化は、これまで実験家の経験と感により実現されてきたが、本研究ではこの過程に機械学習を適用する研究を行った。シミュレーションにより微小電極電圧に対する半導体量子ドット電荷状態のデータセットを用意し、これに対してランダムフォレスト、畳み込みニューラルネットワーク等の機械学習手法を用いて学習を行った。この学習器を利用して、電極電圧の評価、自動調整の手法を研究した。またミクロプローブ測定の手法を、半導体量子ドット中の電子スピンを用いた量子ビットの実験研究等にも活用した。これらの成果は、ミクロプローブを活用して固体微細材料の局所電子状態ダイナミクスの解明を進め、デバイスの高速化等を推進していく上で有用である。さらに

機械学習によるデバイス最適化等は、量子情報処理に向けた将来の大規模量子デバイス等の実現においても重要となる。

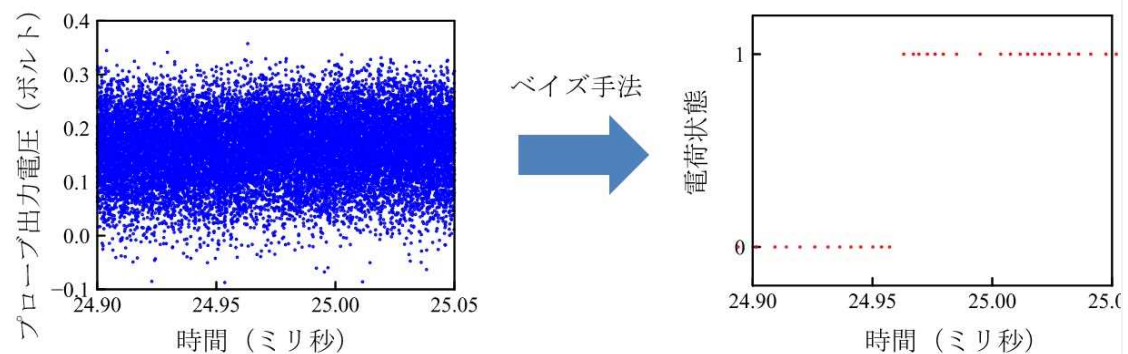


図2 大きなノイズを含むマイクロプローブからのデータ列と、ベイズ手法を活用したマイクロプローブデータ解析。

3. 今後の展開

本研究によりマイクロプローブによる分析手法を、固体微細材料内電子状態のシミュレーション等の理論、マイクロプローブによる測定データを効率的に活用するデータ科学と融合させ、機能性固体微細材料のミクロレベルからの電子物性解析基盤技術を実現した。今後の展開としては、この電子物性解析技術を従来の半導体微細材料だけでなく、他の系にも適用していくことがあげられる。具体的なターゲットとしては、近年注目を集めている原子層材料やトポロジカル材料等を考えている。また機械学習を用いた固体微細構造試料調整の効率化、大規模化も今後重要性がさらに増してくると思われる。半導体量子ドット等を用いた量子ビット集積による実用的な量子コンピュータ実現のためには、大規模に集積化した量子デバイスが必要であり、このデバイス調整過程は従来の人力による手法では実現できない可能性がある。そこで機械学習による調整の効率化、大規模化が有用となると考えられる。

4. 自己評価

「マイクロプローブ測定と電子状態シミュレーションの融合による機能性固体微細材料の基礎物理解明手法の開発」、「マイクロプローブとデータ科学の融合による新ダイナミクス測定手法、及び機能性固体微細材料のダイナミクス解析基盤技術の開発」、いずれの項目においても成果を出すことができたと考えている。特にさきがけ参画により、領域会議での議論や共同研究等を通して、データ科学手法を学び、研究に取り入れることができた点が、これまで実験のみを主体としてきた本研究者にとって重要であった。一方、課題としては開発したミクロレベル電子物性解析基盤技術を、従来の半導体微細材料にとどまらず、幅広い系に適用していくことがあげられる。これにより近年注目を集めている原子層材料やトポロジカル材料等について、新しい観点からの実験データを提示し、研究の進展に貢献できると考えられる。また多体系や大規模系への拡張も今後の課題である。

将来的には、固体微細材料における局所電子状態を活用して、スピントロニクス、量子エレクトロニクス等の新エレクトロニクスデバイスの創製に貢献し、省エネルギー化の推進や、情報化社会に向けた情報処理能力の強化に貢献していきたいと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, P. Stano, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda, G. Allison, S. Li, A. Noiri, T. Ito, D. Loss, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, “Difference in charge and spin dynamics in a quantum dot-lead coupled system”, Physical Review B 99, 085402 (2019).
2. T. Nakajima, A. Noiri, J. Yoneda, M. R. Delbecq, P. Stano, T. Otsuka, K. Takeda, S. Amaha, G. Allison, K. Kawasaki, A. Ludwig, A. D. Wieck, D. Loss, and S. Tarucha, “Quantum non-demolition measurement of an electron spin qubit”, Nature Nanotechnology 14, 555 (2019).
3. T. Ito*, T. Otsuka*, T. Nakajima, M. R. Delbecq, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda, A. Noiri, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, “Four single-spin Rabi oscillations in a quadruple quantum dot”, Applied Physics Letters 113, 093102 (2018), (*equal contribution).
4. J. Yoneda, K. Takeda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, T. Honda, T. Kodera, S. Oda, Y. Hoshi, N. Usami, K. M. Itoh, and S. Tarucha, “A quantum-dot spin qubit with coherence limited by charge noise and fidelity higher than 99.9%”, Nature Nanotechnology 13, 102 (2018).
5. T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda, G. Allison, P. Stano, A. Noiri, T. Ito, D. Loss, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, “Higher-order spin and charge dynamics in a quantum dot-lead hybrid system”, Scientific Reports 7, 12201 (2017).

(2) 特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

<学会発表>

1. T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, P. Stano, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda, G. Allison, S. Li, A. Noiri, T. Ito, D. Loss, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, “Charge and Spin Dynamics in a Quantum Dot-Lead Hybrid System”, International Symposium on Frontiers of Quantum Transport in Nano Science, Kashiwa, Japan, Nov. 9, 2018 (invited).
2. T. Otsuka, S. Nagayasu, T. Nakajima, M. R. Delbecq, J. Yoneda, K. Takeda, A. Noiri, S. Li, T. Ito, S. Tarucha, “Speed up of quantum dot charge sensing utilizing Bayesian estimation”, International Conference on the Physics of Semiconductors, Montpellier, France, Jul. 30, 2018 (oral).
3. 大塚朋廣、永安修也、中島峻、Matthieu R. Delbecq、米田淳、武田健太、野入亮人、Sen Li、伊藤匠、樽茶清悟、「固体微細構造マイクロプローブ計測へのデータ科学手法応用」、日本表面真空学会関東支部講演大会、東京、2019 年 4 月 13 日(招待講演)

<受賞>

4. 文部科学大臣表彰若手科学者賞 2018 年 4 月 17 日
5. 日本物理学会若手奨励賞 2017 年 3 月 18 日