

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26709023

研究課題名(和文)量子スピン情報素子に向けた新構造シリコン量子ドットの開発

研究課題名(英文)Development of new structures of silicon quantum dots toward quantum spin information devices

研究代表者

小寺 哲夫(Kodera, Tetsuo)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：00466856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、新構造のシリコン量子ドットを開発し、スピンを情報の担い手として用いる量子計算の物理の解明、ハードウェアのための基本技術の実現を行うことにあった。将来的に既存シリコンテクノロジーと量子計算機の融合を目指すものであった。物理としては、シリコン量子ドット構造に特有のスピン緩和要因、バレーやスピンの関与する電子輸送特性を明らかにした。技術としては、Si基板やSi/SiGeヘテロ基板を利用した独自の量子ドット構造を作製した。また、Si基板から作製したMOS型新構造量子ドットやSiGeヘテロ基板を利用した新構造シリコン量子ドットに適したスピン操作技術や検出法を開発した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was to develop silicon quantum dots of new structure, to elucidate the physics of spin-based quantum computation and to realize basic technologies for hardware. In the future we aimed to fuse existing silicon technology and quantum computer. In physics, spin relaxation mechanism peculiar to silicon quantum dot structure, electron transport characteristics involving valleys and spins were clarified. As a technique, unique quantum dot structure using Si substrate or Si / SiGe hetero substrate was fabricated. We also developed a spin manipulation technique and detection method suitable for new structures of silicon quantum dots using Si MOS type quantum dots or SiGe hetero substrates type quantum dots.

研究分野：量子技術、固体物性、電子デバイス

キーワード：量子デバイス スピンデバイス 量子情報 量子ドット

1. 研究開始当初の背景

量子計算機が実現されれば、現在の高速計算機では計算不能な問題を解くことができると期待されている。研究開始当初は、シリコン中のスピンを量子ビットに応用する研究は、国内外で近年急速に注目を集めつつあったが、未開拓な学問分野であった。シリコン系量子ドットにおいてスピン量子ビットを実現できれば、核スピン結合が小さいため長いコヒーレンス時間が期待されていた。さらに既存のシリコン集積回路技術との適合性もよいため、非常に有力な候補であると考えられていた。将来的には既存シリコンテクノロジーと量子計算機の融合を目指し、必要となる新構造量子ドット素子の開発に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究の目的は、シリコンナノ構造中のスピンを量子ビットとして用いる量子計算の物理の解明、ハードウェアのための基本技術の実現を行うことにあった。物理としては、シリコン系特有のスピン緩和要因や、バレーやスピンの関与する電子輸送特性を明らかにすることを目指した。技術としては、Si基板やSi/SiGeヘテロ基板を利用した独自の量子ドット構造を作製することを目的とした。また、Si基板から作製したMOS型新構造量子ドットやSiGeヘテロ基板を利用した新構造シリコン量子ドットのそれぞれに適した電子スピンの操作技術や検出法を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、将来の集積に適したシリコン量子ドット素子の開発を行った。具体的には、Si基板を用いてMOS型新構造量子ドットを開発した。エッチングや酸化などシリコン微細加工技術を利用し、量子ドット部の形成には電子線リソグラフィを利用した。作製した素子を用いて、電気伝導特性評価を行った。また、SiGeヘテロ基板を利用した新構造シリコン量子ドットにおいては、スピン状態の回転操作を行った。回転操作のために、単電子スピン共鳴技術を用いた。

4. 研究成果

将来的なスピン量子ビットの集積に向けて、シリコンテクノロジーとの整合性がよいと期待されるMOS型新構造量子ドットの開発を行うことができた。電子をキャリアとするnチャネルの量子ドットにおいては、単電子輸送現象の観測、単電子状態の実現、電荷検出計による量子ドット内の電子数変化の検出技術開発、検出計の量子ドットに対するバックアクションを利用した電子状態の励起、などに成功した。正孔をキャリアとするpチャネルの量子ドットにおいても、単正孔輸送現象の観測、単正孔状態の実現、電荷検出計

による量子ドット内の正孔数変化の検出技術開発を行うことができ、スピンプロックード現象の観測、スピン緩和要因の推定、スピン緩和レートの電圧制御、g因子の評価などに成功した(図1参照)。

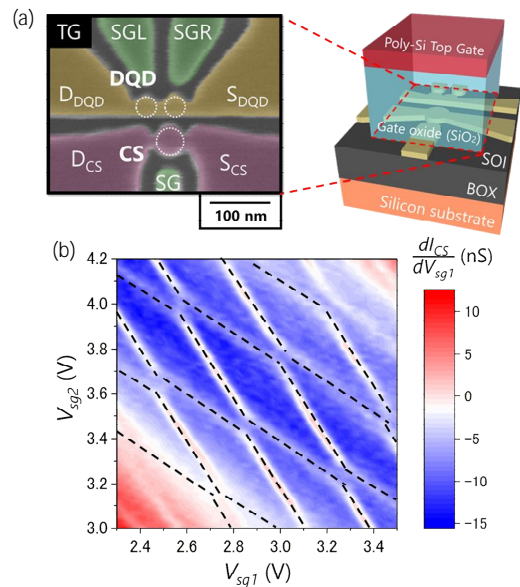


図1. (a)新構造シリコン MOS 型量子ドットの電子顕微鏡写真(左)と模式図(右)。 (b)電荷検出計により取得した二重量子ドットの電荷安定状態図

誤り耐性を持つ量子計算機の実現に向けて、高いゲート操作忠実度を持つ量子ビットの開発も東京大学・理研との共同研究において行うことができた。本研究のため、SiGeヘテロ基板を利用した新構造シリコン量子ドットを開発した。近傍に配置した微小磁石により生成される傾斜磁場中で、電子の位置を高速に電界制御することにより、量子ドット中の電子スピンを従来の10倍程度速く操作できた。同位体未制御のシリコン中において、高いゲート操作忠実度(99.6%)を持つ量子ビットを実装した。誤り耐性量子計算に必要な閾値を上回る操作忠実度を実現した。同位体制御を行ったシリコン中においては、99.9%以上の操作忠実度を実現した。また、コヒーレンス時間とゲート操作時間の比をさらに向上させるためには、電気的ノイズの抑制が重要になるという新たな知見が得られた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計13件)

J. Yoneda, K. Takeda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, T. Honda, **T. Koderu**, 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, 102-106 (2018).
doi:10.1038/s41565-017-0014-x

S. Mizoguchi, N. Shimatani, M. Kobayashi, T. Makino, Y. Yamaoka and T. Kodera "Fabrication and characterization of physically defined quantum dots on a boron-doped silicon-on-insulator substrate", Jpn. J. Appl. Phys. 57, 04FK03-1-4 (2018) 査読有
<https://doi.org/10.7567/JJAP.57.04FK03>

Y. Yamaoka, K. Iwasaki, S. Oda and T. Kodera "Charge sensing and spin-related transport property of p-channel silicon quantum dots" Jpn. J. Appl. Phys. 56, 04CK07-1-4 (2017) 査読有
<https://doi.org/10.7567/JJAP.56.04CK07>

S. Oda, G. Yamahata, K. Horibe and T. Kodera, "Coupled Quantum Dots on SOI as Highly Integrated Si Qubits" Tech. Digest Of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 13.3.1-13.3.4 (2016) 査読有

T. -Y. Yang, A. Andreev, Y. Yamaoka, T. Ferrus, T. Kodera, S. Oda, and D. A. Williams, "Quantum Information Processing in a Silicon-based System" Tech. Digest Of IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 34.2.1-34.2.4 (2016) 査読有

T. Sawada, T. Kodera, and S. Oda, "Electron transport through a single nanocrystalline silicon quantum dot between nanogap electrodes" Applied Physics Letters 109, 213102-1-4 (2016) 査読有
DOI: 10.1063/1.4968008

Y. Yamaoka, S. Oda, and T. Kodera, "Electron transport in physically-defined double quantum dots on a highly doped silicon-on-insulator substrate" Appl. Phys. Lett. 109, 113109-1-4 (2016) 査読有,
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4962841>

K. Takeda, J. Kamioka, T. Otsuka, J. Yoneda, T. Nakajima, M. R. Delbecq, S. Amaha, G. Allison, T. Kodera, S. Oda, S. Tarucha, "A fault-tolerant addressable spin qubit in a natural

silicon quantum dot" Science Advanced, 2, 8, e1600694-1-6 (2016), 査読有,
DOI: 10.1126/sciadv.1600694

S. Ihara, A. Andreev, D. A. Williams, T. Kodera, and S. Oda, "Quantum dots in single electron transistors with ultrathin silicon on insulator structures", Appl. Phys. Lett. 107, 013102-1-4 (2015), 査読有
DOI:10/1063/1.4926335

T. Noguchi, K. Morita, M. Simanullang, Z. Xu, K. Usami, Y. Kawano, T. Kodera and S. Oda, "Ge/Si core/shell nanowires with controlled low temperature grown Si shell thickness", Phys. Status Solidi A 212, 7, 1578-1581 (2015), 査読有
DOI:10.1002/pssa.201532340

K. Horibe, T. Kodera, and S. Oda, "Lithographically-defined few-electron silicon quantum dots based on a silicon-on-insulator substrate", Appl. Phys. Lett. 106, 083111-1-5 (2015), 査読有
DOI:10.1063/1.4913321

K. Horibe, T. Kodera, and S. Oda, "Back-action-induced excitation of electrons in a silicon quantum dot with a single electron transistor charge sensor", Appl. Phys. Lett. 106, 053119-1-4 (2015) 査読有
DOI: 10.1063/1.4907894

K. Yamada, T. Kodera, T. Kambara, and S. Oda "Fabrication and characterization of p-channel Si double quantum dots", Appl. Phys. Lett. 105, 113110 (2014) 査読有
DOI: 10.1063/1.4896142

[学会発表](計99件)

(招待講演) T. Kodera, Y. Lu S. Oda, "Physically-defined two silicon double quantum dots coupled electrostatically toward integrated quantum bits" Cambridge Summit 2018, Murray Edwards College, University of Cambridge, UK, January 4-6, (2018)

(招待講演) T. Kodera, "Silicon Quantum Dot Devices for Spin Quantum Bits" 2nd Global Congress & Expo on Materials Science and Nanoscience, Valencia, Spain, September 26 (2017)

(招待講演) **小寺哲夫**, 「シリコン量子コンピュータに向けた基盤技術開発」, 電子情報通信学会 8 月度シリコン材料・デバイス研究会、北海道大学、札幌、2017 年 7 月 31 日

S. Mizoguchi, Y. Yamaoka, T. Makino, N. Shimatani, and **T. Koderu**, “Fabrication and characterization of p-type heavily doped quantum dots” 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2017), PS-9-9 (Late News), Sendai, Japan, September 21 (2017)

J. Yoneda, K. Takeda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, T. Honda, **T. Koderu**, S. Oda, Y. Hoshi, N. Usami, K. M. Itoh and S. Tarucha, “An isotopically-enriched silicon spin qubit with >99.9% fidelity and charge-noise-limited coherence” 3rd Conference and Workshop on Spin-Based Quantum Information Processing, Sydney, Australia, November 6-11 (2017)

M. Kobayashi, E. Tylaite, N. Shimatani, Y. Yamaoka, and **T. Koderu**, “Physically-defined p-channel silicon double quantum dots with a charge sensor” 3rd Conference and Workshop on Spin-Based Quantum Information Processing, Sydney, Australia, November 6-11 (2017)

J. Yoneda, K. Takeda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, T. Honda, **T. Koderu**, S. Oda, Y. Hoshi, N. Usami, K. M. Itoh, S. Tarucha, “Charge-noise-limited coherence and three-nines fidelity of an enriched Si/SiGe spin qubit” Silicon Quantum Electronics Workshop 2017, Oregon, USA, August 19 (2017)

K. Takeda, J. Yoneda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, J. Kamioka, T. Honda, **T. Koderu**, S. Oda, Y. Hoshi, N. Usami, K. M. Itoh, S. Tarucha, “Microwave induced frequency shift and its quadrature compensation for Si/SiGe spin qubit”, Silicon Quantum Electronics Workshop 2017, Oregon, USA, August 18 (2017)

N. Shimatani, Y. Yamaoka, R. Ishihara, A. Andreev, D. A. Williams, S. Oda, **T. Koderu**, “Hole transport properties in physically defined silicon quantum dots operating at 25 K” The 22nd International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-22) The Penn State University, Pennsylvania, USA, July 31 - August 4 (2017)

A Andreev, T-Y Yang, M F Gonzalez-Zalba, Y Yamaoka, T Ferrus, S Oda, **T Koderu** and D A Williams, “Transport Through Si QDs in Coulomb Blockade Regime: Theory and Experiment” International Workshop on Computational Nanotechnology, Windermere, UK, 5-9 June (2017)

(招待講演) S. Oda, G. Yamahata, K. Horibe and **T. Koderu**, “Coupled Quantum Dots on SOI as Highly Integrated Si Qubits”, 2016 IEEE International Electron Devices Meeting, 13.3, San Francisco, USA, December 06 2016

(招待講演) **T. Koderu**, Spin-based quantum information devices using physically-defined silicon quantum dots, A06, EMN meeting on quantum 2016 (EMN2016) Phuket, Thailand, April 08 2016

T. -Y. Yang, A. Andreev, Y. Yamaoka, T. Ferrus, **T. Koderu**, S. Oda, and D. A. Williams, “Quantum Information Processing in a Silicon-based System” 2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 34.2, San Francisco, USA, 7 Dec. (2016)

K. Takeda, J. Kamioka, J. Yoneda, T. Otsuka, M.R. Delbecq, G. Allison, T. Nakajima, **T. Koderu**, S. Oda, and S. Tarucha, “Centre resonance frequency shift of a strongly driven silicon quantum dot spin qubit” The international workshop on Nano-Spin Conversion Science and Quantum Spin Dynamics (NSCS-QSD 2016) Tokyo, Japan, 12-15, October (2016)

J. Yoneda, K. Takeda, T. Otsuka, T. Nakajima, M.R. Delbecq, G. Allison, T. Honda, **T. Koderu**, S. Oda, Y. Hoshi, T. Usami, K.M. Itoh, and S. Tarucha, “High-fidelity spin control in an

- enriched Si/SiGe quantum dot with a micromagnet” The international workshop on Nano-Spin Conversion Science and Quantum Spin Dynamics (NSCS-QSD 2016) Tokyo, Japan, 12-15, October (2016)
- Y. Yamaoka, K. Iwasaki, S. Oda and **T. Koderu**, “Single hole transport and magnetic field dependence of Pauli spin blockade in p-channel silicon double quantum dots”, 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016), M-2-05 (Late News), Tsukuba, Japan, 26-29 September (2016)
- (招待講演) T-Y. Yang, Y. Yamaoka, T. Kambara, **T. Koderu**, S. Oda, D. A. Williams, “Charge qubit states in isolated silicon structures” : Quantum Science Symposium Europe 2016, Cambridge, UK 21st July (2016)
- T. Koderu**, S. Ihara, T. Nishino, S. Hiraoka, A. Andreev, D. Williams, S. Oda, “Fabrication and characterization of physically-defined quantum dots in an ultrathin silicon-on-insulator layer” P-070, Silicon Quantum Electronics Workshop 2016, Delft, Netherland, 13-14 June (2016)
- Y. Yamaoka, K. Iwasaki, S. Oda, **T. Koderu**, “Magnetic field dependence of Pauli spin blockade in p-channel silicon double quantum dots” P-041, Silicon Quantum Electronics Workshop 2016, Delft, Netherland, 13-14 June (2016)
- T. Ferrus, T-Y. Yang, Y. Yamaoka, T. Kambara, S. Oda, **T. Koderu**, D. Williams, “Charge qubit states in quantum dots : effect of doping on operations and coherence” P-057, Silicon Quantum Electronics Workshop 2016, Delft, Netherland, 13-14 June (2016)
- 21 K. Takeda, J Kamioka, J Yoneda, T Otsuka, M Delbecq, G Allison, T Nakajima, **T Koderu**, S Oda, S. Tarucha, “AC Stark effect and optimal control of a strongly driven Si/SiGe quantum dot spin qubit” O-052, Silicon Quantum Electronics Workshop 2016, Delft, Netherland, 13-14 June (2016)
- 22 M. Maekawa, J. T. Pearl, E. Herbschleb, Y. Yamaoka, **T. Koderu**, S. Oda, “Controlling the asymmetric line-shape of charge-trapped induced resonances in a single quantum dot” The 9th International Conference on Quantum Dots (QD2016), PM-106, Jeju, Korea, 22-27 May (2016)
- 23 (招待講演) 堀部浩介、**小寺哲夫**、小田俊理「スピン量子デバイスに向けた少数電子シリコン量子ドットの研究」第63回応用物理学会春季学術講演会、21a-S422-3、第7回シリコンテクノロジー一分科会論文賞受賞記念講演、東京工業大学、目黒区 2016-03-21
- 24 (招待講演) **小寺哲夫**「スピン量子情報デバイスに向けたシリコン量子ドットの研究」第76回応用物理学会秋季学術講演会、シンポジウム 量子情報へ向けたシリコンテクノロジーからの挑戦、15p-2M-9、名古屋国際会議場 2015-09-15
- 25 **T. Koderu**, K. Horibe, K. Yamada, S. Ihara, T. Kambara, A. Andreev, D. A. Williams, Y. Arakawa, and S. Oda, “Physically-defined quantum dots fabricated on silicon-on-insulator substrate”, Silicon Quantum Electronics Workshop 2015, P-15, Takamatsu, Japan, 4 August 2015 (poster)
- 26 S. Hiraoka, K. Horibe, **T. Koderu**, and S. Oda, “Physically-Defined Few-Electron Triple Quantum Dots in Metal-Oxide-Semiconductor Structures” 21th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), Mo-PE-30, Sendai, Japan 27 July 2015
- 27 K. Horibe, K. Yamada, **T. Koderu**, and S. Oda, “Few-Electron and Few-Hole Regimes in Silicon Double Quantum Dots” 21th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), Th-PE-28, Sendai, Japan 30 July 2015
- 28 Y. Yamaoka, **T. Koderu**, S. Oda, “Fabrication and characterization of physically-defined double quantum dots without unintentional localized states on highly-doped silicon

substrate” The 2015 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW2015) 5-7, Kyoto, Japan June 14, 2015

- 29 K. Iwasaki, **T. Kodera**, and S. Oda, “Charge sensing of p-channel double quantum dots fabricated on (110) silicon substrate” The 2015 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW2015) 7-5, Kyoto, Japan June 14, 2015
- 30 T. Honda, K. Horibe, R. Mizokuchi, L. Yi, K. Iwasaki, S. Hiraoka, **T. Kodera**, S. Oda, “Coupled Si quantum dot devices” 11th International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC11), Fukuoka, Japan 11 May 2015
- 31 (招待講演) **T. Kodera**, “Few-carrier regimes in lithographically-defined Si quantum dots” 3rd International Conference and Exhibition on Materials Science & Engineering, 07 October, 2014 San Antonio, USA
- 32 (招待講演) **T. Kodera**, “Fabrication and Characterization of Silicon Double Quantum Dots for Quantum Information Devices” Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2014, Incheon, Korea, 26 June 2014

他、67件

〔図書〕(計1件)

T. Kodera and S. Oda, Nanoscale Silicon Devices, CRC press, Chapter 10, “Coupled Si quantum dots for spin-based qubits” (2015), 288 (231-253)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.quantum.ee.e.titech.ac.jp/>

アウトリーチ活動

小寺哲夫、「半導体ものづくり体験を通じた知的創造力の育成」理科教育振興支援 - ものづくり人材の裾野拡大支援プロジェクト -、東京工業大学、2017年3月23日

日

小寺哲夫、「半導体微細加工とその応用」開成高等学校訪問対応、「日本再生：科学と技術で未来を創造する」プロジェクト、東京工業大学、2015年3月12日

小寺哲夫、「量子技術で実現する将来の電子デバイス」作新学院高校訪問対応、東京工業大学、2014年12月20日

小寺哲夫、「電子1個やスピン1つで動作する究極の電子デバイス」オープンキャンパス 第5類 電気電子工学科 特別講演、東京工業大学、2014年8月8日

受賞

Best International Poster Presentation Award, The 3rd Conference and Workshop on Spin-Based Quantum Information Processing, M. Kobayashi, E. Tylaitte, N. Shimatani, Y. Yamaoka, and **T. Kodera** “Physically-defined p-channel silicon double quantum dots with a charge sensor” 2017-11-10

第7回応用物理学会シリコンテクノロジー分科会論文賞 応用物理学会シリコンテクノロジー分科会、堀部浩介、**小寺哲夫**、小田俊理、2016-03-21

対象論文：“Lithographically-defined few-electron silicon quantum dots based on a silicon-on-insulator substrate” Appl. Phys. Lett. **106**, 083111 (2015)

INC11 Japan Nano Day Best Poster Award, T. Honda, K. Horibe, R. Mizokuchi, L. Yi, K. Iwasaki, S. Hiraoka, **T. Kodera**, S. Oda, “Coupled quantum dot devices” 2015-05-11

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小寺 哲夫 (KODERA, Tetsuo)
東京工業大学・工学院・准教授
研究者番号：00466856

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

堀部 浩介 (HORIBE Kosuke)、山岡 裕 (YAMAOKA Yu)、ANDREEV Aleksey、溝口 来成 (MIZOKUCHI Raisei)