様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　２ 年　 ５ 月 ２７ 日現在

機関番号：８２４０１
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2015～2019
課題番号：１５Ｈ０４０００

研究課題名（和文）シリコンMOS技術と整合性をもつスピン量子ビットとその大規模集積化

研究課題名（英文）Spin qubits compatible with silicon MOS technology and their large-scale integration

研究代表者
大野　圭司（Ono, Keiji）

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員

研究者番号：００３０２８０２

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　12,800,000円

研究成果の概要（和文）：本提案の目標は3つ、1)MOSFET内のDB欠陥による電子スピン・核スピン量子ビットの実現、2)欠陥の個数、位置および準位エネルギーの制御、3) 2つのMOSFETにそれぞれ存在する量子ビットを結合する技術の理論研究である。研究は当初のDB欠陥を深い不純物へ、MOSFETをその一種であるTFETへと変更しつつ行われた。目標1)を達成しただけでなく、従来よりも2桁も高い温度10ケルビンでの量子ビット動作を実現した。また深い不純物を利用によりその密度および準位エネルギーの制御が可能となり、目標2)もほぼ達成できた。3)に関しては理論的研究を進めただけでなく、予備実験を行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究で実現したシリコン量子ビットの高い動作温度は、ミリケルビン温度域での動作が常識的であり、そこでの制御の精度のみをスペックとして競っていた従来の量子ビット研究の価値観を大きく転換するものであった。申請者が本提案で初めて指摘した概念“深い準位で実装される室温動作シリコン量子ビット”は従来の想定とは全くことなる新しい使われ方をする量子計算機の可能性を切り開いた。例えばクラウド利用が前提であるミリケルビン量子計算機に対し、モバイル機器を含むあらゆる計算機に搭載可能な室温動作シリコンビットは、従来の提案とは全くことなった量子技術の社会実装につながるものである。

研究成果の概要（英文）：The goals of this proposal are three, 1) realization of a qubit by electron spin / nuclear spin degrees of freedom of DB defects in MOSFET, 2) control of the number, position and level energy of defects, 3) Theoretical study of technology for coupling between qubits existing in two MOSFETs. The research was carried out while changing the original DB defect into a deep impurity and the MOSFET into TFET (a type of MOSFET). Not only has Goal 1) been achieved, but qubit operation has been achieved at a temperature of 10 Kelvin, which is two orders of magnitude higher than before. Moreover, the density and level energy can be controlled by using deep impurities, and the target 2) was almost achieved. Regarding 3), not only did we proceed with theoretical research, but we were also able to carry out preliminary experiments.

研究分野：半導体の量子輸送

キーワード：スピン　量子ビット　シリコン

※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、研究者個人に帰属されます。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

半導体微細加工技術、極低温低ノイズ電気特性測定技術の発展により、微小な空間に単一の伝導電子を閉じこめた構造（量子ドット）にソース、ドレイン、ゲート各電極が結合した量子ドット素子の研究、とりわけドット中の電子スピン自由度を量子情報処理へ利用するための基礎研究が盛んに行われていた。これらの素子において、電子スピンに依存した電流閉鎖メカニズム（スピンブロッケード）や量子ドット内に存在するごく小数の核スピンを電気的に制御・検出する手法が申請者らによって開発された。

スタンフォード大の研究グループにより、実用的量子コンピュータの構築には 10 の 9 乗個に達する物理量子ビットが必要であることが見出された。これは、実用的量子ビットは 10 の 9 乗個の規模で集積化可能な系で実装されなければならないことを意味する。そのような系は、シリコン MOS 技術によって実現される大規模集積回路をおいて他になく、そのような系はシリコン MOS 技術をおいて他にない。実用的な量子コンピュータも古典コンピュータ同様シリコン MOS 技術の上でしか成り立たたず、その実現のためにはシリコン MOS 技術と整合性をもつ量子ビットが必要となる。

シリコン MOSFET のチャネル/ゲート絶縁膜界面近傍に存在に存在するダングリングボンド（DB）欠陥の研究が行われていた。DB 欠陥の準位はシリコンバンドギャップ中程に位置し、電子スピン自由度を有するため、電気検出磁気共鳴による研究がなされていた。例えばシリコン/窒化シリコン界面付近の DB 欠陥アンサンブルの電気検出磁気共鳴が窒化シリコン膜を透過するトンネル電流によって観測されている。この磁気共鳴信号には欠陥近傍の 29Si 核スピンによる超微細分裂も観測された。これは DB 欠陥の電子スピンだけでなく、欠陥近傍の核スピン自由度へも電気的アクセスが可能であることを示唆している。

２．研究の目的

シリコン MOSFET の DB 欠陥の電子スピン、および欠陥近傍の核スピン自由度をシリコン MOS 技術と整合性をもつ量子ビットの有力候補ととらえ、以下の 3 つ課題を達成する。

1）DB 欠陥の電子スピン・核スピン自由度を MOSFET の電気的操作によりコヒーレントに制御し DB 欠陥スピン量子ビットを実現する。

2）チャネル中の DB 欠陥の個数、位置および準位のエネルギーを制御する技術を確立する。

3）シリコン MOS 技術と整合性を持ち、隣接する 2 つの MOSFET のチャネル中にそれぞれ存在する 2 つの DB 欠陥スピン量子ビットの間にエンタングルメントを生じさせる coupler の動作原理を開発する。これは理論的研究であり研究期間内に coupler の動作実証までは行わない。

３．研究の方法

2015、2016 年度においては短チャネルのシリコン MOFET 素子における欠陥準位の研究を行った。単一電子磁気共鳴（電子スピン量子ビットのスペクトロスコピーに相当）、とりわけそこでみられるスピン・軌道相互作用に着目し連携研究者による数値計算との比較を行った。2016 年度より、MOSFET と平行して TFET（シリコントンネル FET 素子）の研究を行った。DB 欠陥に代わり、イオン注入されたに深い不純物準位を介した量子ドット的電気電導を扱った。この素子においてスピンブロッケードと、単一電子磁気共鳴を観測した。2017 年度より TFET に注力した研究を行った。電子スピンのコヒーレント制御に成功、温度 10K までの高温動作を実現した。また量子 coupler の検証実験に必要となる 2 スピン同時磁気共鳴も行った。2018 年度には量子ビットエネルギーがゲート電圧に依存することを利用し、一定磁場のもと、ゲート電圧を変調することで量子ビットエネルギーを変調することで単一量子ビット量子シミュレーション実験を行った。2019 年度においては量子熱機関の単一量子ビット量子シミュレーション実験を行ったほか、スピンブロッケードと小規模スピン鎖の結合に着目、量子 coupler へむけた予備実験を行った。

４．研究成果

本研究において、提案で挙げた目標 1)を達成しただけでなく、従来よりも 2 桁も高い温度 10 ケルビンでの量子ビット動作を実現した。また深い不純物を利用によりその密度および準位エネルギーの制御が可能となり、目標 2)もほぼ達成できた。3)に関しては理論的研究を進めただけでなく、予備実験を行うことができた。

MOFET 欠陥準位の単一電子磁気共鳴(電子スピン量子ビットのスペクトロスコピーに相当）とスピン・軌道相互作用は Phys. Rev. Lett.誌に掲載された。TFET における電子スピン量子ビットと温度 10K までの高温動作は Scientific Report 誌に掲載された。また単一量子ビット量子シミュレーション実験は Phys. Rev. Lett.誌掲載された。量子熱機関の量子シミュレーション実験をまとめた論文は現在査読中である。他、複数の原著論文、学会誌における解説記事が執筆され、多くの招待講演を受けた。

上記目標の達成や論文等の成果に加え、本研究において申請者により初めて提示された概念が研究コミュニティーに与えた影響も重要な成果であることを指摘したい。本研究の提案を行った 2014 年から 2020 年現在までに量子計算機、とりわけそのハードウェアによる実装に多くの進歩があったことは周知のとおりである。技術的に先行する超電導系量子ビットだけでなく、本提案のようなシリコン量子ビット研究もこの 6 年で一大研究コミュニティー築くに至った。そのコミュニティーは世界中の大学、研究機関のみならずインテルをはじめ複数の大手半導体企業により形成されている。本研究提案で申請者が提示した新概念 “ 実用的な量子計算機は 10 の 9 乗個の規模で集積化可能な系で実装されなければならない。そのような系はシリコン MOS 技術をおいて他にない。したがって唯一シリコン MOS 技術に立脚した量子ビットが実用的量子計算機の構成要素である ”は、現在ではシリコン量子ビットコミュニティーにとり最も重要な論理的支柱となっている。

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　1件）

１．著者名 [K. Ono, T. Mori, S. Moriyama	４．巻 9
２．論文標題 High-temperature operation of a silicon qubit	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Scientific reports	６．最初と最後の頁 469
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1038/s41598-018-36476-z	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 K. Ono, S. N. Shevchenko, T. Mori, S. Moriyama, F. Nori	４．巻 印刷中
２．論文標題 Quantum interferometry with a g-factor-tunable spin qubit	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Phys. Rev. Lett.	６．最初と最後の頁 印刷中
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 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 K. Ono, G. Giavaras, T. Tanamoto, T. Ohguro, X. Hu, and F. Nori,	４．巻 119
２．論文標題 Hole spin resonance and spin-orbit coupling in a silicon metal-oxide-semiconductor field-effect transistor	５．発行年 2017年
３．雑誌名 Phys. Rev. Lett.	６．最初と最後の頁 156802
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.156802	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

１．著者名 Y. Kondo, S. Amaha, K. Ono, K. Kono, and S. Tarucha	４．巻 115
２．論文標題 Critical Behavior of Alternately Pumped Nuclear Spins in Quantum Dots	５．発行年 2015年
３．雑誌名 Phys. Rev. Lett.	６．最初と最後の頁 186803
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.186803	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 M. Kawamura, K.Ono, P. Stano, K.i Kono, and T. Aono,	4．巻 115
2．論文標題 Electronic Magnetization of a Quantum Point Contact Measured by Nuclear Magnetic Resonance	5．発行年 2015年
3．雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6．最初と最後の頁 36601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.036601	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 T. Tanamoto,K. Ono,Y. X. Liu, and F. Nori	4．巻 5
2．論文標題 Dynamic creation of a topologically-ordered Hamiltonian using spin-pulse control in the Heisenberg model	5．発行年 2015年
3．雑誌名 Scientific Reports	6．最初と最後の頁 10076
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi:10.1038/srep10076	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 －

〔学会発表〕　計22件（うち招待講演　11件／うち国際学会　7件）

1．発表者名 K. Ono
2．発表標題 A high-temperature silicon qubit and its quantum interference
3．学会等名 The 2nd Symposium for World Leading Research Centers－ Materials Science and Spintronics－（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2019年

1．発表者名 K. Ono
2．発表標題 A high-temperature silicon qubit and its quantum interference
3．学会等名 RIKEN-Berkeley workshop on Quantum Information Science (RB19)（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2019年

１．発表者名 K. Ono
２．発表標題 A high-temperature silicon qubit and its quantum interference
３．学会等名 International Workshop on Hybrid Quantum Systems（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2019年

１．発表者名 大野 圭司、森 貴洋、森山 悟士
２．発表標題 スピンブロッケード状態にある2つのスピンのラビ振動とその相関
３．学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
４．発表年 2018年

１．発表者名 大野圭司
２．発表標題 最近の半導体量子ドット･スピン量子ビット研究を理解するための基礎知識
３．学会等名 日本物理学会2017年秋季大会（招待講演）
４．発表年 2017年

１．発表者名 大野圭司
２．発表標題 シリコン量子系のスピン制御、シンポジウムハイブリッド量子系における電磁界制御
３．学会等名 第78回応用物理学会秋期学術講演会（招待講演）
４．発表年 2017年

１．発表者名 K. Ono
２．発表標題 Toward high operation temperature of spin qubits in silicon tunnel field-effect transistor
３．学会等名 Low-Dimensional Science workshop 2017（招待講演）
４．発表年 2017年

１．発表者名 森 貴洋、森山 悟士、松川 貴、安田 哲二、大野 圭司
２．発表標題 シリコントンネルトランジスタのスピン量子ビット応用
３．学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
４．発表年 2018年

１．発表者名 青野友祐、Peter Stano、川村稔、大野圭司、小峰啓史
２．発表標題 面内磁場下の量子ポイントコンタクトにおける動的核スピン偏極
３．学会等名 日本物理学会第73回年次大会
４．発表年 2018年

１．発表者名 K. Ono, G. Giavaras, T. Tanamoto, T. Ohguro, X. Hu, and F. Nori
２．発表標題 Hole spin resonance and spin-orbit coupling in a silicon metal-oxide-semiconductor field-effect transistor
３．学会等名 International workshop on Silicon Quantum Electronics Workshop
４．発表年 2017年

１．発表者名 Satoshi Moriyama, Takahiro Mori, Keiji Ono
２．発表標題 Quantum dots and spin qubits based on silicon tunnel field-effect transistors
３．学会等名 WINDS 2017, 2017 Workshop in Innovative Nanoscale Devices and Systems（招待講演）
４．発表年 2017年

１．発表者名 Satoshi Moriyama, Takahiro Mori, Keiji Ono
２．発表標題 Quantum-dot transport via deep levels in silicon tunnel field-effect transistors (TFETs)
３．学会等名 ICDS 2017, 29th International Conference on Defects in Semiconductors
４．発表年 2017年

１．発表者名 K. Ono
２．発表標題 Emerging Quantum Information Technologies (panelist of rump session)
３．学会等名 SSDM2016（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2016年

１．発表者名 K. Ono
２．発表標題 Single charge and single spin effect in silicon CMOS devices
３．学会等名 Low-Dimensional Science workshop 2016（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2016年

１．発表者名 大野圭司、森貴洋、森山悟士
２．発表標題 スピン量子ビットによるMotional averaging
３．学会等名 日本物理学会第72回年次大会
４．発表年 2017年

１．発表者名 森山悟士、森貴洋、大野圭司
２．発表標題 シリコントンネルトランジスタにおける深い準位を介した単一電子輸送とマイクロ波応答
３．学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
４．発表年 2016年

１．発表者名 Satoshi Moriyama, Takahiro Mori, Keiji Ono
２．発表標題 Quantum-dot devices in CMOS-compatible tunnel field-effect transistors (TFETs)
３．学会等名 Quantum-CMOS Integration Technology (QCIT) Workshop
４．発表年 2016年

１．発表者名 森山悟士，森貴洋，大野圭司
２．発表標題 短チャネルトンネルトランジスタにおける結合量子ドット的電子輸送とマイクロ波応答
３．学会等名 第63回応用物理学会春季学術講演会
４．発表年 2016年

１．発表者名 大野圭司，森貴洋，森山悟士
２．発表標題 TFETにおけるチャージポンピングとスピン効果
３．学会等名 第63回応用物理学会春季学術講演会
４．発表年 2016年

１．発表者名 [6]T. Mori, Y. Morita, S. Migita, K. Hukuda, Q. Mizubayashi, T. Yasuda, M. Masahoku, T. Matsukawa, H. Ota, S. Moriyama, K. Ono, S. Iizuka, T. Nakayama
２．発表標題 ON current boosting in Silicon-based Tunnel FETs Utilizing Isoelectronic Trap Technology
３．学会等名 The 2015 International Workshop on “Dielectric Thin Films for Future Electron Devices (2015 IWDTF)（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2015年

１．発表者名 大野圭司
２．発表標題 シリコンMOS素子における単一電子スピン効果
３．学会等名 第76回応用物理学会秋期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（招待講演）
４．発表年 2015年

１．発表者名 K. Ono, T. Mori, S. Moriyama
２．発表標題 Room-temperature single-electron transistor based on tunnel field-effect transistor (TFET) and deep level
３．学会等名 Silicon Quantum Electronics Workshop 2015（国際学会）
４．発表年 2015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