

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630167

研究課題名(和文) シリコンMOS素子におけるゲート絶縁膜中の不純物スピンを利用したメモリ素子

研究課題名(英文) Memory device based on impurity nuclear spins in gate insulating layer of MOS device

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・石橋極微デバイス工学研究室・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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：シリコンMOSトランジスタ構造においてゲート絶縁膜の内部に意図的にドナーおよびアクセプター的な不純物の導入により局在準位を導入し、そのゲートリーク電流特性に現れる、局在準位を介したトンネル電気伝導を扱う。この系と、“人工的に形成された局在準位”を介した電気伝導を扱う量子ドット素子との類似性に着目し、申請者がこれまで量子ドット素子研究で培ってきた局在準位を介した電気伝導、特にそこに現れる電子スピン・核スピン効果に関する知識と経験をもとに、MOS構造において絶縁膜中の局在準位の電子スピンおよび核スピン状態の電氣的制御を行うことで新しいメモリ素子の可能性を探索する。

研究成果の概要(英文)：In the silicon MOS transistor structure, localized levels are intentionally introduced into the gate insulating film by the introduction of impurities like donor and acceptor. The tunneling conduction via such localized state appeared as the gate leakage current. Focusing on the similarity between this leakage current and the transport of quantum dot device where an electric conduction occur via "artificially formed localized state", the applicant has examined the electrical control of the electron spin and the nuclear spin state of the localized level in the insulating film in the MOS structure based on the knowledge and experience concerning the electric conduction through the electric conductor, especially the electron spin / nuclear spin effect appearing therein. This study explore the possibility of a new memory device that use a nuclear spins as a memory element.

研究分野：半導体量子ドットの電気伝導

キーワード：電子スピン 核スピン

1. 研究開始当初の背景

現在の情報化社会を支える半導体素子の主役であるMOSトランジスタの多くはSiとその酸化物である絶縁体 SiO₂ の薄膜により構成されている。素子サイズの微細化・低消費電力化が進む中、理想的なトランジスタ特性を実現するためにより薄く、局在準位などの欠陥の少ない SiO₂ 膜が求められてきた。しかし膜厚が 2nm を切るあたりから電子が SiO₂ 膜をトンネル効果により透過してしまう現象が現れることが知られている。このトンネル効果で流れる電流(リーク電流)はトランジスタの正確な動作を阻害し素子の待機電力を増やすため、微細化による素子性能向上の妨げになっている。

2. 研究の目的

シリコン MOS トランジスタ構造においてゲート絶縁膜の内部に意図的にドナーおよびアクセプター的不純物の導入により局在準位を導入し、そのゲートリーク電流特性に現れる、局在準位を介したトンネル電気伝導を扱う。この系と、“人工的に形成された局在準位”を介した電気伝導を扱う量子ドット素子との類似性に着目し、申請者がこれまで量子ドット素子研究で培ってきた局在準位を介した電気伝導、特にそこに現れる電子スピン・核スピン効果に関する知識と経験をもとに、MOS 構造において絶縁膜中の局在準位の電子スピンおよび核スピン状態の電氣的制御を行うことで新しいメモリ素子の可能性を探索する。

3. 研究の方法

適切なエネルギーをもつ不純物準位が導入された適度な膜厚の絶縁膜で MOS 構造を作製した場合、そのリーク電流は数個の不純物準位を介したトンネル電流が支配的になると予想される。このような系は数個の量子ドットを介したトンネル電気伝導と同等とみなすことができ、量子ドット素子同様のスピンおよび核スピン状態の電氣的制御が可能であると考えられる。

SiO₂、とりわけ SiO₂/Si 界面の研究は長い歴史をもち、素子の信頼性に影響をおよぼす局在準位の研究が数多くなされてきた。MOS 構造において絶縁膜中に存在する局在準位の評価手法として知られる電気検出磁気共鳴は、電流経路中にある局在準位を並列配置された複数の 1 重量子ドットと見なしたスピン依存電気伝導とみなすこともできる。この系でこれまで観測されたスピン依存ゲートリーク電流は背景電流(非スピン依存電流)にくらべ強度比でわずか 10⁻⁵ 程度しかなく、局在準位の評価には役立つものの、スピン依存電流自体を素子機能として用いることは困難である。

一方で絶縁膜中に“ドナー的な局在準位”と“アクセプター的な局在準位”の両者が存在し、電子が電極 ドナー準位 アクセプタ

ー準位 電極の順にトンネルすることにより運ばれる電流が支配的な場合、この系は並列配置された複数の 2 重量子ドットにおける (0,1) (1,1) (0,2) (0,1) 電荷状態サイクルによるトンネル電流とみなすことができ、申請者らが量子ドット素子において観測してきたような電子スピン・核スピン効果が現れると予想される。実際このようなトンネル電流が支配的な 2 重量子ドット素子では、スピン依存電流は背景電流比で 1-10 以上と桁違いに大きなものとなることが知られており、素子機能としての利用が十分可能な大きさである。

4. 研究成果

2014 年度末までにおいて研究計画に対し 2 点の変更を行った。1 点目として、局在準位への電氣的アクセス手法として研究計画で上げたゲートリーク電流測定に変わり、チャネル長(ゲート幅)が十分短い MOS トランジスタの subthreshold 領域において観測されるソース・ドレイン間の量子ドットの伝導を用いた。研究計画で提案したゲートリーク電流に比べ、この手法は量子ドット電気伝導との類似性がより高く、量子ドット物理をより直接的に応用することが可能になった。また 2 点目として、研究計画で述べた電極 ドナー準位 アクセプター準位 電極のトンネル電流パスを形成する局在準位として、当初計画では 1) ダングリングボンド欠陥と 2) 絶縁膜中へのドーピングによるアクセプター的な局在準位の組み合わせを想定していたが、2) に変わり、3) SiO₂/ゲート金属界面近傍に存在するポテンシャル揺らぎによる局在準位との組み合わせを用いた。これら 2 点の変更により単一ダングリングボンド欠陥の電子スピン共鳴を電氣的に検出することに成功した。また研究に用いる試料として、研究計画時には 1) 理研ナノサイエンス棟クリーンルームで作製する MOS ダイオード、および 2) 半導体企業の基礎研究所から供与される MOS トランジスタ、の両者を想定していたが、その後共同研究先の東芝研究開発センターより高品質な微細 MOS トランジスタの供与を受けたため、後者に注力して研究を行った。

MOS トランジスタのソース・ドレイン間の量子ドットの伝導は量子ドット物理との対応性はいいものの、動作温度が低温に限られるという欠点があった。そこで 2015 年度より、素子を MOSFET からトンネル電界効果トランジスタ(TFET)に変更した。素子は共同研究先である産総研ナノエレクトロニクス部門より供給された。TFET はゲート変調可能な PIN 構造であることからシリコンバンドギャップ深くに位置するダングリングボンド欠陥を介した量子ドットの電気伝導が可能であり、温度 200K までのダングリングボンドを介した量子ドットの電導の観測に成功した。

さらに 2016 年度においてはダンダリンググボンドに変わる、より制御性の高い深い準位の探索と更なる動作温度の向上を目指した。制御性の高い深い準位として、シリコン中の Al-N 複合不純物を用いた。Al-N 複合不純物を導入した TFET において最大 0.3eV に及ぶ強い量子閉じ込めを実現し、室温における単一電子トンネル効果を観測することに成功した。また 1.5K から 12K までの温度において、Al-N 複合不純物起因と思われる電気検出磁気共鳴を観測した。さらに温度 8K 程度において、磁気共鳴信号位置が 2 レベルテレグラフノイズ的に変化する現象を観測した。このテレグラフ的变化は電子スピン近傍の核スピンに由来する可能性があり現在解析を進めている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- [1] K. Ono, G. Giavaras, T. Tanamoto, T. Ohguro, X. Hu, and F. Nori, Interplay of hole spin resonance and spin-orbit coupling in a silicon metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, submitted. 査読有
 - [2] Y. Kondo, S. Amaha, K. Ono, K. Kono, and S. Tarucha, Critical Behavior of Alternately Pumped Nuclear Spins in Quantum Dots, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 186803 (2015). 査読有
 - [3] M. Kawamura, K. Ono, P. Stano, K. Kono, and T. Aono, Electronic Magnetization of a Quantum Point Contact Measured by Nuclear Magnetic Resonance, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 036601 (2015). 査読有
 - [4] T. Tanamoto, K. Ono, Y. X. Liu, and F. Nori, Dynamic creation of a topologically-ordered Hamiltonian using spin-pulse control in the Heisenberg model, *Scientific Reports* **5**, 10076 (2015). 査読有
 - [5] S. Amaha, W. Izumida, T. Hatano, S. Tarucha, K. Kono, and K. Ono, Spin blockade in a double quantum dot containing three electrons, *Phys. Rev. B* **89**, 085302 (2014). 査読有
- 〔学会発表〕(計 19 件)
- [1] 大野圭司、森貴洋、森山悟士、スピン量子ビットによる Motional averaging、日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学豊中キャンパス、2017 年 3 月 17 - 20 日
 - [2] 森山悟士、森貴洋、大野圭司、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、日本物理学会 2016 年秋季大会、金沢大学角間キャンパス、2016 年 9 月 13-16 日
 - [3] K. Ono, panelist of rump session: Emerging Quantum Information Technologies - Quantum for sustaining the Moore's law -, SSDM2016, Tsukuba international conference center, Tsukuba, Japan, September 26-29, 2016.
 - [4] K. Ono, Single charge and single spin effect in silicon CMOS devices, Low-Dimensional Science workshop 2016, 28-30 August, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan (invited).
 - [5] Satoshi Moriyama, Takahiro Mori, Keiji Ono, Quantum-dot devices in CMOS-compatible tunnel field-effect transistors (TFETs), Quantum-CMOS Integration Technology (QCIT) Workshop, Delft, Netherlands, 15, June, 2016.
 - [6] 森山悟士、森貴洋、大野圭司、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の電子輸送とマイクロ波応答、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、2016 年 3 月 19-22 日
 - [7] 大野圭司、森貴洋、森山悟士、TFET におけるチャージポンピングとスピン効

- 果、第 63 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学大岡山キャンパス、2016 年 3 月 19-22 日
- [8] M. Kawamura, K. Ono, P. Stano, K. Kono, T. Aono, Magnetization of a quantum point contact measured by resistively-detected nuclear magnetic resonance, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2015), November 17-20, NTT Atsugi R&D center, Atsugi, Kanagawa, Japan.
- [9] 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, ON current boosting in Silicon-based Tunnel FETs Utilizing Isoelectronic Trap Technology, The 2015 International Workshop on “Dielectric Thin Films for Future Electron Devices (2015 IWDTF), November 2-4, 2015, Miraikan, Koto-ku, Tokyo, Japan.
- [10] 大野圭司、シリコン MOS 素子における単一電子スピン効果、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、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、愛知県名古屋市、2015 年 9 月 13-16 日(招待講演)。
- [11] K. Ono, T. Mori, S. Moriyama, Room-temperature single-electron transistor based on tunnel field-effect transistor (TFET) and deep level, Silicon Quantum Electronics Workshop 2015, August 3-4, 2015, Kagawa international conference hall, Takamatsu, Kagawa, Japan.
- [12] M. Kawamura, K. Ono, P. Stano, K. Kono, and T. Aono, Magnetization measurement of a quantum point contact by means of nuclear magnetic resonance, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), July 26-31, 2015, Sendai International Center, Sendai, Japan.
- [13] 大野圭司、Si 短チャンネル MOS 素子における欠陥準位制御と電子スピン共鳴、日本物理学会領域 4 シンポジウム、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学早稲田キャンパス、東京都新宿区、2015 年 3 月 21-24 日(招待講演)。
- [14] 川村稔, 大野圭司, Peter Stano, 青野友祐 A, 河野公俊、抵抗検出型核磁気共鳴による量子ポイントコンタクトの磁化測定、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学早稲田キャンパス、東京都新宿区、2015 年 3 月 21-24 日。
- [15] 大野圭司, 森貴洋, 森山悟士、短チャンネルトンネルトランジスタにおける Al-N イオン注入で形成した深い準位を介する単一電子輸送、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学湘南キャンパス、2015 年 3 月 11-14 日。
- [16] 大野圭司, 森貴洋, 森山悟士、短チャンネルトンネル電界効果トランジスタにおける深い準位を介した単一電子輸送、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学札幌キャンパス、2014 年 9 月 17-20 日。
- [17] 大野圭司, 棚本哲史, 大黒達也, G. Giavaras, F. Nori, 短チャンネル MOSFET における電子スピン共鳴とスピン軌道相互作用, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学春日井キャンパス、愛知県春日井市、2014 年 10 月 7-11 日。
- [18] 川村稔, 大野圭司, Peter Stano, 青野友祐, 河野公俊, 面内磁場下における量子ポイントコンタクトの抵抗検出型核磁気共鳴、日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学春日井キャンパス、愛

知県春日井市, 2014 年 10 月 7-11 日。

[19] S. Amaha, G. Kurosawa, Y. Kondo, K. Ono, S. Tarucha, Spin Blockaded State Transition & Bi-Stability of Two Stable Nuclear Spin Fixed Points in Coupled Quantum Dots, ICPS 2014., August 10-14, Austin convention center, Austin, Texas, USA.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：単電子トランジスタ及びその製造方法並びに集積回路
発明者：森貴洋、大野圭司、森山悟士
権利者：独立行政法人産業技術総合研究所
種類：
番号：2015-146869
出願年月日：2015/07/24
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 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・石橋極微デバイス工学研究室・専任研究員

研究者番号：00302802

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし