

令和元年6月14日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03900

研究課題名(和文)シリコントンネルトランジスタの量子ドットデバイス応用に関する研究

研究課題名(英文)Quantum-dot devices in silicon-based tunnel field-effect transistors

研究代表者

森山 悟士(Moriyama, Satoshi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主任研究員

研究者番号：00415324

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：トンネル電界効果トランジスタ(TFET)はP型電極-チャネル-N型電極からなるMOSFET構造を持つトランジスタである。本研究では、素子作製プロセス工程中でAlおよびNがチャネル中に注入されたAl-NドーパドTFET素子の電子輸送を調べ、Al-Nイオン注入によって形成されたと考えられる深い準位を介する単一電子伝導、マイクロ波照射による量子ドット中の単一電子スピン共鳴の観測、さらに量子ビット動作となる単一電子スピンのラビ振動を観測することに成功した。これらの成果は、シリコンTFETが単一電子トランジスタやスピン量子ビット素子などの量子ドットデバイスとして応用できることを示したものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、シリコンテクノロジーに立脚したTFETの量子ドットデバイスとしての有用性を示すことができた。単一もしくは少数素子レベルでの動作が確立されれば、それらを集積し、外部周辺回路と接続した大規模回路の構築へのハードルは、他の電子材料に比べれば格段に低く、基礎研究の成果を産業の発展へスムーズに繋げられることが期待できる。シリコンデバイス技術に立脚した集積化単一電子・量子情報処理デバイスが開発できることを実証した本研究成果は学術的および産業的にも意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Tunnel field-effect transistors (TFETs) look like MOSFETs but have different types of the source and drain, for example P-type TFETs have n-type sources and p-type drains. The bandgap act as a tunnel barrier, and TFETs use a pn junction with the tunnel barrier modulated by gate electrostatic control. In this study, we investigated electron transport in an Al-N-doped TFET device in which Al and N were implanted into the transport channel. We observed single-electron transport through the implantation-induced atomic-size QDs embraced in TFETs. Furthermore, electron spin resonance of a single-spin was observed under continuous microwave irradiation. Also, with pulse-modulated microwave driving, Rabi oscillations as time-ensemble measurements were observed, which corresponds to the single qubit operation. These results indicate that silicon TFETs can be applied as quantum-dot devices such as single electron transistors and spin-based quantum computing devices.

研究分野：量子ナノデバイス

キーワード：量子ドット トンネルトランジスタ 単電子トランジスタ 電子スピン共鳴 スピン・ブロックード  
ラビ振動 量子ビット 量子コンピュータ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

トンネル電界効果トランジスタ (TFET) は従来型の金属 - 酸化物 - 半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) のスイッチングの理論限界を打ち破る急峻なスイッチングが可能であり、次世代の超低消費電力 VLSI の基本素子として注目されている。その動作は、価電子帯から伝導体への Zener 型バンド間トンネリングにより電流が流れ、トンネル障壁厚をゲート制御することによって流れる電流量が変化する。従来型 MOSFET がキャリアの熱励起によるスイッチングとドリフト輸送によって動作するのに対し、TFET はトンネル効果を用いた、本質的に量子力学的な動作原理を持つ素子であるといえる。研究開始当初、シリコン中の不純物や MOSFET のチャンネル中に存在する不純物を量子ドットとして用いる方法が数多く提案されていた。シリコン技術との整合性から、集積化単電子素子や量子情報処理の素子としての応用が期待され、アメリカ・ヨーロッパを中心に量子物理の研究者とシリコンデバイスの研究者が連携して量子デバイス応用に向けた研究がなされはじめていた。連携研究者である森は、シリコン TFET 素子の研究において、オン電流を増強するために等電子不純物によるトラップ準位を中間準位として利用し、運動量保存則を緩和することを着想、トンネル電流の増大に成功した。(T. Mori *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 083501 (2015). 等)。一方で、この中間準位を介したトンネル現象は、極微細な短チャンネル素子においては単一の量子準位を介した単一電子輸送が発現されると期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、シリコン集積化技術を用いて作製された TFET において、イオン注入により形成された準位を介した単一電子輸送現象、単一電子ダイナミクスを調べ、量子準位の物性解明とその量子ドットデバイス応用の可能性を探究した。従来型の MOSFET がキャリアの熱励起によるスイッチングとドリフト輸送によって動作する、いわば準古典的な素子であるのに対し、TFET は本質的に量子力学的トンネル効果を利用した素子であり、量子効果デバイスへ展開できるポテンシャルを持っている。本研究により、シリコンデバイス技術に立脚した集積化量子エレクトロニクスの分野を開拓することを目指した。

### 3. 研究の方法

短チャンネル TFET 素子における単一電子輸送とマイクロ波との結合による単一電子ダイナミクス、単一電子スピン共鳴を調べることににより、電子輸送に介在する量子準位の物性解明を行い、量子ドットデバイスとして応用できるかを探究する。TFET 試料は産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門が有するシリコン素子の試作ラインを使用した。素子の単一電子輸送ダイナミクス測定による物性解明・デバイス動作実証を行い、結果を試料作製にフィードバックすることにより量子ドット素子としての最適化を図る。図 1(a)に素子の模式図を示す。素子作製プロセス工程中でアルミニウム (Al) および窒素 (N) がチャンネル中に注入された、チャンネル長 60 - 100 nm の Al-N ドープ TFET 素子を 1.5 K から 300 K の温度範囲で電気伝導特性を評価した。ソース電圧  $V_S$  (または  $V_D$ ) とゲート電圧  $V_G$  を印加しながらドレイン電流  $I_D$  (または  $I_S$ ) を測定した。磁場はソース - ドレイン電流に対して垂直または平行に印加し、マイクロ波をデバイス近傍に導入することで単一電子のマイクロ波応答、単一電子スピン共鳴などの単一電子ダイナミクス測定を行った。

### 4. 研究成果

チャンネル長 60 - 80 nm の多くの短チャンネル Al-N ドープ TFET 素子が低温において単一電子輸送特性を示し、その中には室温まで単一電子輸送が観測される、強い閉じ込めを持つ素子もあり、電子輸送に図 1(b)に示すような深い準位が関わっていることを示唆する結果を得た。さらにいくつかの素子では、直列二重結合量子ドットの形成(図 1(c))を示唆する電子輸送現象を示した。

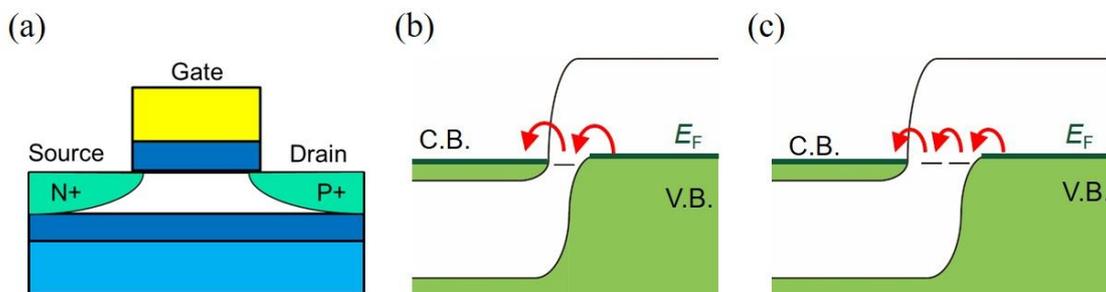


図 1: TFET 量子ドットデバイス。(a) N 型のソース電極, P 型のドレイン電極から構成される P 型 TFET 素子の模式図。(b, c) バンドギャップ中の深い単一量子準位を 1 つ(b)もしくは 2 つ(c) 経由した単一電子伝導の模式図。それぞれが単一量子ドット伝導, 二重結合量子ドット伝導に対応する。C.B., V.B.,  $E_F$  はそれぞれ伝導帯, 価電子帯, 電極のフェルミエネルギー, を示す。

直列二重結合量子ドットが形成された素子では、図 1(c)に示す 2 つの量子準位を共鳴的に電子がトンネルする共鳴トンネル伝導、また後述するスピン・ブロッケード現象が観測された。二重結合量子ドットは、マイクロ波応答や、単一電子の電子スピン共鳴(ESR)、単一量子のコヒーレント制御など量子デバイスとしての動作を実現するための基本構造といえる。

量子ドット中の単一電子スピン状態の形成と制御は、直列二重結合量子ドットのスピン・ブロッケード状態を用いて行うことができる。単一電子輸送を制御して、例えば図 1(c)の左側のドットに電子が 1 個存在している状況を準備する。この場合、電子のスピンは上向き、下向きどちらの可能性もあるが、上向きスピン状態である場合を考える。ここでソースから電子が右のドットに入り、左のドットに抜ける方向にバイアスを印加すると、右のドットには上向き下向きどちらのスピンも入ることができる。もし下向きスピンが入れば左側のドットを通過して、さらにドレインへ抜け電流が流れる。しかし、ソース、ドレイン電極には上向き、下向きどちらのスピンも存在するので、必ずある確率で右のドットに上向きスピンが入る。このとき、電子はパウリの排他原理により左側のドットへはスピンの向きを変えない限り移動することができない。右側のソースへもトンネルバリアがあるために戻れない。したがって左右のドットに上向きスピンが 1 個ずつ入った状態となり、電流が停止する。これがスピン・ブロッケード状態で、最初に左側のドットの電子が下向きスピン状態の場合もスピンの向きが変わるだけで同じ議論となる。ここでドット中のスピンの向きを変えなければ電流が流れない、というのが重要で、スピン・ブロッケード状態で静磁場を印加し、ゼーマン分裂を形成、そこに高周波による回転磁場を印加することによってスピンの向きを変えてやれば、電流が流れることができる。このようにして単一電子のスピン共鳴を電流によって検出することが可能となる。

実験では、共鳴トンネルおよび、スピン・ブロッケード的な電子輸送現象を示す素子のマイクロ波応答を調べた。図 2 は、連続マイクロ波を照射したときの共鳴トンネルピークのマイクロ波強度依存性を示したもので、複数のサテライトピーク、および電流ピークがマイクロ波強度に対して Bessel 関数の 2 乗に比例して変化する Landau-Zener-Stückelberg-Majorana 干渉パターンを示している。図 3(a)は、スピン・ブロッケード領域において静磁場を素子に印可した状態でマイクロ波応答を調べたもので、電流検出による ESR 信号が観測された。また温度 12 K までこの単一電子の ESR を観測することに成功した(図 3(b))。温度  $T = 12$  K の熱エネルギー  $k_B T$  ( $k_B$ : ボルツマン定数)は、単一電子スピンのゼーマン分裂のエネルギー (ESR 周波数) よりも 100 倍近く高いエネルギーに相当する。このようにはるかに高い温度においても ESR が観測できるのは、スピン・ブロッケードを用いた単一電子スピン状態読み出しの利点の一つである。

次に、連続マイクロ波の代わりに、パルス変調されたマイクロ波を繰り返し印加することで単一電子スピンのコヒーレント制御を試みた。これは電子スピン量子ビットの量子操作に対応する。スピン・ブロッケードにより二重結合量子ドットの各量子ドット中に 1 個ずつ存在する 2 つの電子スピンは、スピン 3 重項状態の 1 つである平行状態になり、これが量子ビットの初期状態となる。ここで片方の ESR 周波数をもつマイクロ波パルスを印可すると、パルス幅に応じた電子スピンの回転がおこる。この結果、2 電子スピンのスピン 3 重項状態とスピン 1 重項状態との重ね合わせになり、このスピン 1 重項状態に比例した確率でスピン・ブロッケードが解除される。このパルスを一定間隔で繰り返し印加することによってスピンの初期化・重ね合わせ・読み出しが繰り返され、時間アンサンブル平均としてスピン・ブロッケード状態のリーク電流が増加する。このリーク電流をパルス幅の関数としてプロットしたものが図 4(a)で、単一電子スピンのコヒーレント振動(ラビ振動)の観測に成功した。

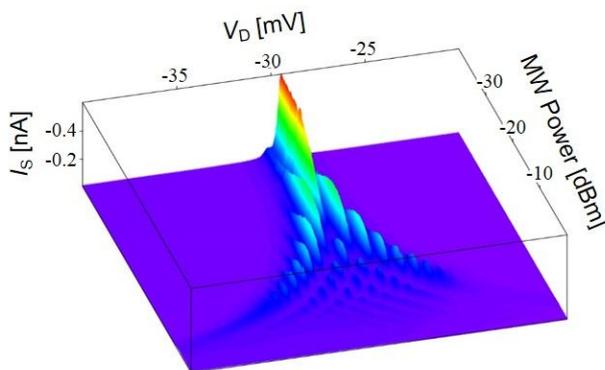


図 2: Landau-Zener-Stückelberg-Majorana 干渉パターンの観測。測定温度は 1.5 K, ソース電流( $I_s$ )-ドレイン電圧( $V_D$ )で観測される共鳴トンネルピークにおける、マイクロ波 27.68 GHz を照射したときのマイクロ波強度依存性。マイクロ波強度に対して Bessel 関数の 2 乗に比例して電流ピーク高さは変化し、またマイクロ波周波数  $f$  に対応する単一光子のエネルギー  $hf$  ( $h$ : プランク定数)に対応したサテライトピークが現れ、またその干渉パターンが観測された。

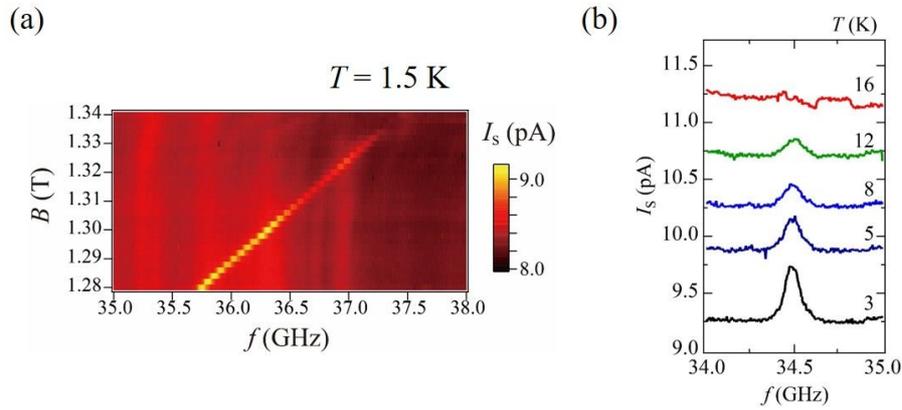


図 3: 連続マイクロ波照射による単一電子スピン共鳴の観測。磁場はソース - ドレイン電流に対して垂直に印加している。(a) スピン・ブロッケード領域に二重結合量子ドットの電子状態を固定した状態における、静磁場下でのリーク電流のマイクロ波応答。(b) 単一電子スピン共鳴の温度依存性。磁場は 1.220 T に固定。(雑誌論文 より)

ラビ振動の振幅 ( $\sim 0.1$  pA) は、パルスの繰り返し周期 ( $1 \mu\text{s}$ ) とほぼ一致している。図 4(b) は、ラビ振動の周波数離調依存性の測定結果で、スピン量子ビット動作の証拠としてよく知られるシェブロン型のパターンが観測されている。ラビ振動は、5 K まではっきりと観測可能であり、10 K においてもまだ検出可能であった。

本研究において、チャンネル長 60 - 80 nm の短チャンネル Al-N ドープ TFET 素子を 41 個評価し、そのうち 37 個の試料で単一電子輸送特性を観測することができた。これらの成果は、シリコン TFET が単一電子トランジスタやスピン量子ビット素子などの量子ドットデバイスとして応用できることを示したものである。

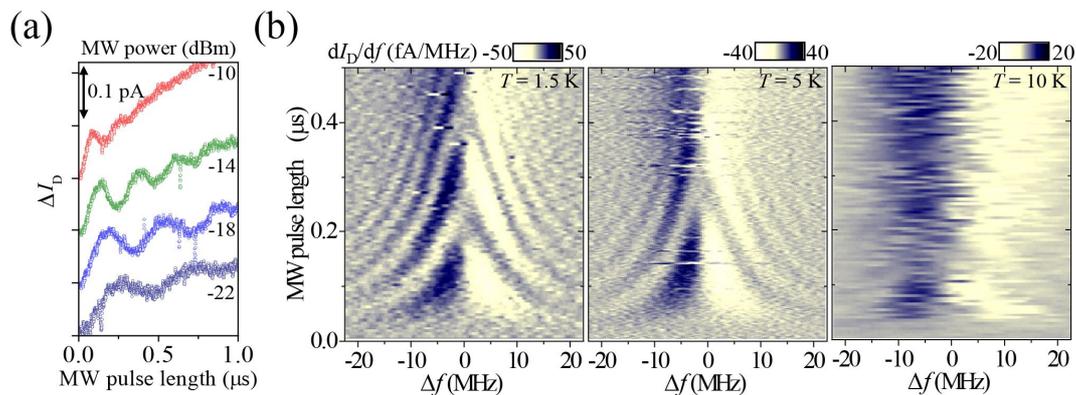


図 4: シリコン TFET 素子による単一電子スピンのコヒーレント制御。(a) パルス変調されたマイクロ波のドレイン電流の定常状態の変化によるラビ振動の観測。(b) 温度 1.5 K, 5 K, 10 K におけるラビ振動のマイクロ波離調依存性。(雑誌論文 より)

本研究によって、シリコンテクノロジーに立脚した TFET の量子ドットデバイスとしての有用性を示すことができた。単一もしくは小数素子レベルでの動作が確立されれば、それらを集積し、外部周辺回路と接続した大規模回路の構築へのハードルは、他の電子材料に比べれば格段に低く、基礎研究の成果を産業の発展へスムーズに繋げられることが期待できる。シリコンデバイス技術に立脚した集積化単一電子・量子情報処理デバイスが開発できることを実証した本研究成果は学術的および産業的にも意義があると考えられる。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

Keiji Ono, Takahiro Mori, and Satoshi Moriyama: “High-temperature operation of a silicon qubit”, *Scientific Reports*, **9**, 469 (2019). (査読有)

DOI: 10.1038/s41598-018-36476-z

〔学会発表〕(計9件)

森 貴洋, 森山悟士, 松川 貴, 安田哲二, 大野圭司: “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”, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 3/17-3/20, 2018.

Satoshi Moriyama, Takahiro Mori, Keiji Ono (invited): “Quantum dots and spin qubits based on silicon tunnel field-effect transistors”, WINDS 2017, 2017 Workshop in Innovative Nanoscale Devices and Systems, Hawaii, USA, November 26 – December 1, 2017.

Satoshi Moriyama, Takahiro Mori, Keiji Ono: “Quantum-dot transport via deep levels in silicon tunnel field-effect transistors (TFETs)”, ICDS 2017, 29th International Conference on Defects in Semiconductors, Shimane, Japan, July 31 – August 4, 2017.

Keiji Ono, Takahiro Mori, Satoshi Moriyama (invited): “Room temperature single electron transistor and spin qubit operation up to 10 K in silicon tunnel field-effect transistor (TFET)”, QTech 2017, International Workshop on Quantum Technologies, Tokyo, Japan, June 12-13, 2017.

大野圭司, 森 貴洋, 森山悟士: “スピン量子ビットによる Motion averaging”, 日本物理学会第72回年次大会, 大阪, 3/17-3/20, 2017.

Satoshi Moriyama, Takahiro Mori, Keiji Ono: “Single-electron spin control in CMOS-compatible tunnel field-effect transistors (TFETs)”, MANA International Symposium 2017, Tsukuba, Japan, February 28 – March 3, 2017.

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, 9/13-9/16, 2016.

Satoshi Moriyama, Takahiro Mori, Keiji Ono: “Quantum-dot transport and spin effects in silicon-based tunnel field-effect transistors (TFETs)”, PASPS 9, 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids, Kobe, Japan, 8-11, August, 2016.

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 . 研究組織

### (1) 研究協力者

連携研究者氏名: 大野 圭司

ローマ字氏名: Ono Keiji

所属研究機関名: 国立研究開発法人理化学研究所

部局名: 石橋極微デバイス工学研究室

職名: 専任研究員

研究者番号(8桁): 00302802

### (2) 研究協力者

連携研究者氏名: 森 貴洋

ローマ字氏名: Mori Takahiro

所属研究機関名: 国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名: ナノエレクトロニクス研究部門

職名: 主任研究員

研究者番号(8桁): 70443041

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。