

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23226009

研究課題名(和文)シリコンナノ構造を基盤としたドーパント原子デバイスの開発

研究課題名(英文)Development of dopant atom devices based on silicon nanostructures

研究代表者

田部 道晴(Tabe, Michiharu)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：80262799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 161,100,000円

研究成果の概要(和文)：これまでシリコンテクノロジーは、意図的に導入する多数の不純物原子(ドーパント原子)を統計平均的に利用することによって発展してきた。本研究は、デバイスの極限的微小化に向けてこの概念を一新し、個々のドーパント原子を利用したデバイスを開発しようとするものである。実用に向けて技術を確立するために、数個のドーパント原子集団を一つの量子ドットとして利用する手法を提案・実証するとともに極低温に限られていたデバイス動作温度を改善して室温動作に至った。ドーパント原子デバイスの研究はこれらの成果によって大きく踏み出すことができた。

研究成果の概要(英文)：Silicon technology has continuously developed by utilizing statistically averaged effect of many dopants. This research project aims at developing individual dopant atom devices for ultimately miniaturized devices. As a result, in order to step forward for practical application, we have succeeded in high-temperature (room temperature) operation with help of a quantum dot formation due to a few dopants. Based on these results, dopant device technology has launched for new electronics.

研究分野：半導体電子工学

キーワード：電子デバイス・機器 シングルドーパント シリコン 量子ドット ドーパント原子 ナノデバイス
トランジスタ

1. 研究開始当初の背景

シリコンテクノロジーは、トランジスタの発明以来ドーパント不純物原子を利用して発展してきた。しかし、素子の微細化に伴い、チャンネル中のドーパント原子の個数が減少して配置による特性ばらつき（ドーパント揺らぎの問題）が顕在化してきている。一方、全く別の「原子」の視点からの研究として、単ドーパント原子による FET トンネル特性が、我々 (PRL(2010)) を含むいくつかのグループによって報告され始めており、極限的微小デバイスとして原子デバイスの扉が開かれつつあった。

2. 研究の目的

本研究計画は、このような状況下で1個のドーパント原子を用いたトランジスタを基本とし、さらに2個~数個を利用したドーパント原子デバイスを開発し、新しい学術・技術基盤の構築を目指すものである。すなわち、Si ナノ構造中にドーパント原子1個~数個を埋め込んでトンネル型電子輸送を制御し、究極の小型・低消費電力デバイス群を開発する。ドーパントは大きさの揃った極小量子ドットとみなされ、また、複数個のドーパントを組み合わせれば輸送キャリア数も1個単位で制御できるという従来デバイスにはない特長を備えている。

3. 研究の方法

本研究計画では、デバイス、第一原理計算、ドーパント原子の検出・評価、高精度ドーピングの各要素研究を総合的に進めていくが、特にドーパント原子 FET の開発を重点目標とする。期間前半は主に低温での原理実証を、後半はドーパントの複合化やナノチャンネル形状効果を駆使して動作温度の高温化・室温化を図る。本研究は、研究代表者（田部（静大））と3名の研究分担者（小野（富山大）、品田（東北大）、水田（北陸先端大/サザンプトン大））の各グループの密接な連携の下で進めた。

4. 研究成果

(1) ドーパント原子 FET の 100K 動作：

従来の報告では、ナノ MOSFET において、リンドナー原子を介したトンネル電流はドナー準位が 45meV と浅いために、極低温での観測に限られていた。しかし、我々は、誘電・量子閉じ込め効果を利用すればドナー準位を深くすることができると考え、チャンネル中央部に突起をもたせたスタブ型チャンネル FET を作製した。その結果、**図1**に示すようにスタブ部にあるリン原子を介したトンネル輸送が 100K 以上で観測されることを見出した（PRB(2013)：**応物学会シリコンテクノロジー分科会論文賞受賞**）。この結果は高温動作に向けての重要な一歩となったが、依然として室温動作には程遠い状況であり、さらに深い量子井戸の作製を必要とした。

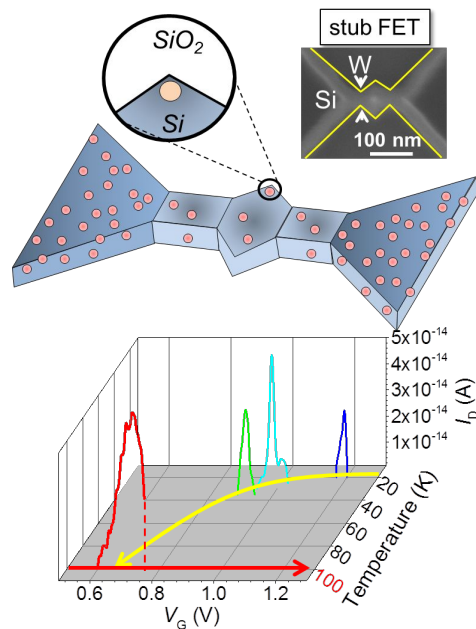


図1. スタブ構造の FET (上図) とリンドナーを介したトンネル電流ピーク (下図)。100K での動作が観測された (PRB (2013))。

(2) ドーパント分子 FET の作製と室温動作：さらに深い量子井戸を作製するために、リンドナーをチャンネル中央部の微小領域に選択ドーピングし、近接した複数個のリンドナー（ド

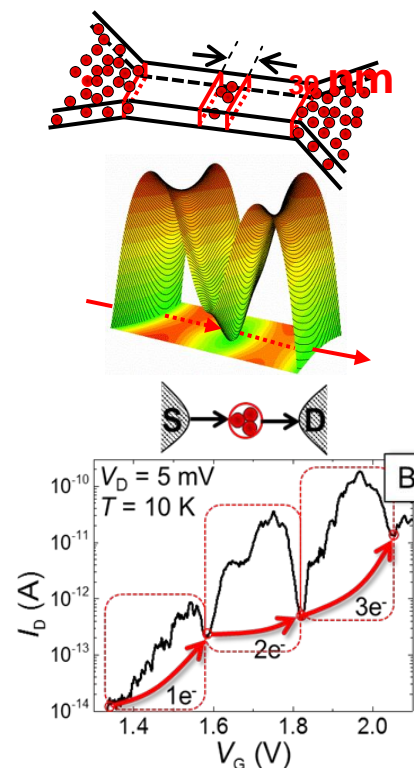


図2. 微小領域にリンドーピングしたドーパント分子 FET の模式図とその電子状態を反映した単電子トンネル特性 (Sci. Rep. (2014))。

ナー分子)を用いる試みを行った。その結果、**図2**に示すように、互いに近接した数個のリンドナーがひとつの深い量子井戸を形成し、それを介した単電子トンネル電流を観測することができた (Sci. Rep. (2014))。ごく最近、**図2**のFETをさらに細線化して温度特性を測定したところ、**図3**のように**室温(300K)でA, B, Cの3つのトンネル電流ピークが観測され、本研究計画の主たる目標であるドーパント原子デバイスの室温観測に至った**。これら各ピークはリンドナー分子が作る基底準位を反映したものである (IEEE Si Nanoelectron. Workshop 2016 にて発表予定、論文投稿準備中)。

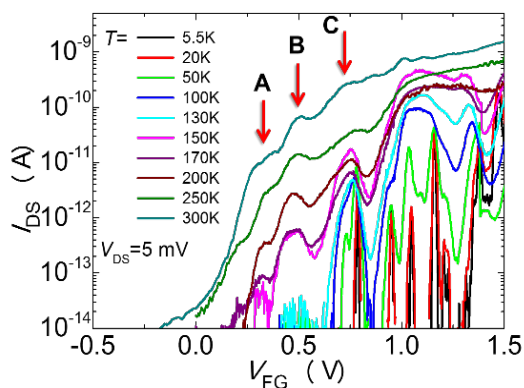


図3. 微小領域に選択ドーパしたリンドナー分子FETの温度特性 (IEEE Si Nanoelectron. WS 2016 にて発表予定)。

(3) 複数個のドナーの制御と利用 (電界によるドナーの融合とドナー列の電子状態):
チャンネル内に比較的近接して存在する2個のリンドナーは、弱電界では互いに分離しているが、強電界をかけると合体融合し、1個の

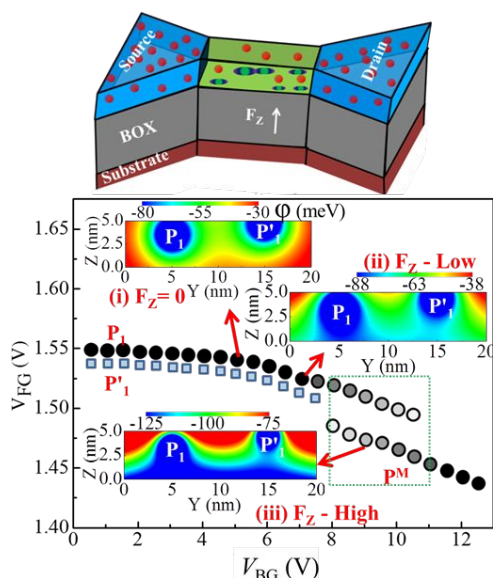


図4. 強電界による2つのリンドナーの電位の重なり (融合) を示す FET 特性 (Sci. Rep. (2015))。

量子井戸として働くことを実験的に示した (Sci. Rep. (2015))。この成果は、本研究計画の中では、ドナーにトラップされた電子の読み出し・移動を用いるメモリ応用の基本プロセスである。しかし、2個のリンドナーに捉えられた電子のスピ状態をゲート電界で読み出し・制御する方式の量子コンピュータにとっても必要な操作であり、今後幅広い応用が考えられる。

また、研究分担者品田らは、独自技術であるシングルイオン注入法を用いてヒ素を少数個アレイ状に注入し、1次元ドナーバンド構造を人工的に作ることによって特徴的な I_g - V_g 特性を低温で得た (Nat. Nano(2012))。ドーパント原子デバイスが、単一量子井戸にとどまらず、独自のバンド構造利用の可能性を示したものである。

(4) 横型中濃度ナノ pn 接合ダイオード:

FETと同様にpn接合ダイオードも微細化していくとドーパント数は減少して個々のドーパント原子の影響が顕在化してくると予想される。しかし、ナノ pn 接合の報告例は少なく、その物理はほとんど未解明であった。我々は、断面が 10nm オーダーの中濃度レベルの pn 接合ダイオードを作製し、順方向電流のバイアス依存性を詳しく調べたところ、空乏層端近傍の1個のドーパントが充放電を繰り返すことによってランダムテレグラフ信号 (RTS) が現れることを見出し、ダイオードにおける個別ドーパント原子の影響を初めて報告した (APL(2013))。このようすを**図5**に示す。さらにこのドーパントの充放電現象は、ケルビンプローブフォース顕微鏡 (KFM) による局所電位変動によって、より直接的に証明することができた (APL(2013))。

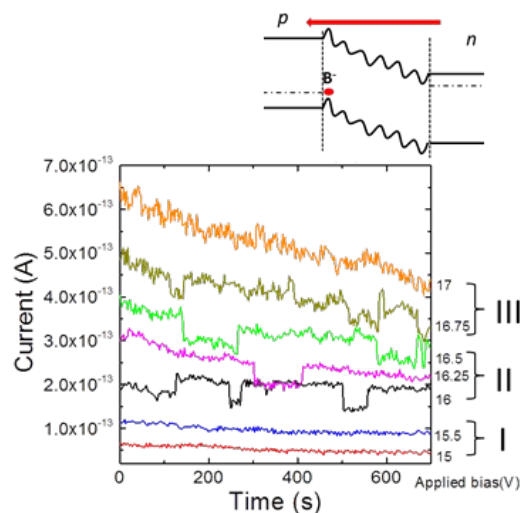


図5. ナノ pn ダイオードのランダムテレグラフシグナル (下) とその起源 (上) (APL (2013))。

(5) 横型ナノエサキダイオードにおけるドナー・アクセプター対共鳴トンネル効果:
pn 接合ダイオードの中でも最近重要度が増

しているデバイスが高濃度 pn ダイオードである。特に、バンド間トンネル輸送は、急峻なオンオフ特性をもつ次世代の微細トランジスタの動作原理として注目されてきている。**図6**は、ナノエサキダイオードの模式図(上図)と、我々が発見した特徴的な I-V 特性(下図)である。通常のエサキダイオード特性の上に鋭い電流ピークが重畳されており、ゲート電圧に相当する基板電圧に強く依存する。これは pn 接合部の 1 対のリン・ボロン原子を介した共鳴トンネルによるものであることが水田グループの第一原理計算からも明らかとなった(**APL (2016)**)。エサキダイオード特性も、微細化していくと個別のドーパントの効果によって、特性が支配されることを示した初めての結果であり、微細トランジスタの ON 電流を大幅に増大できるため、応用上大きな利点となる。

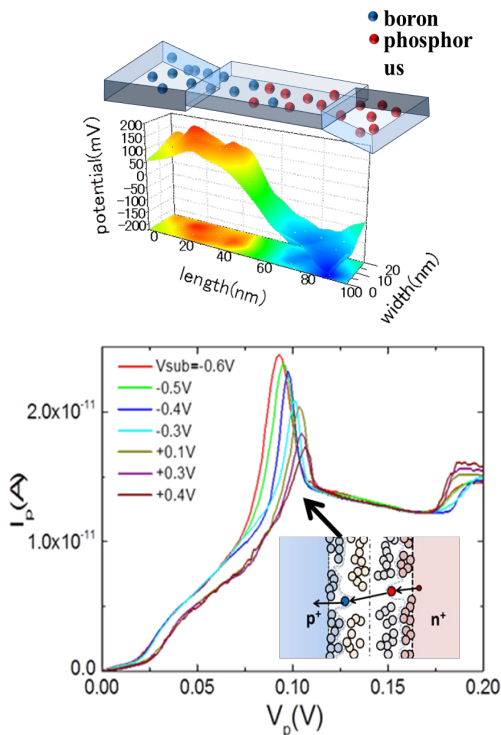


図6 . ナノエサキダイオードの模式図と特徴的な I-V 特性。接合部でのリン・ボロン対を介した共鳴トンネル電流が観測される (**APL (2016)**)。

(6) ドーパント原子による光子検出 :
リンをドーパした FET で、**図7**に示すように可視光域の光子が吸収されると光誘起電子が 1 個の P ドナーにトラップされ、それに伴い FET 電流 I_d が時間変動することを見出した(**APL(2011)**)、(**PSSA(2011):Editor 紹介論文**)。これは 1 個のドーパントによる光子検出に関する初めての報告である。これと並行して、ナノ pn ダイオードの光子吸収効果を調べたところ、特徴的な多値 RTS を観測した。FET の場合とは異なり、pn 接合部のボロンとリンの複合体への光励起

電子トラップが示唆された (**APEX(2012)**)。

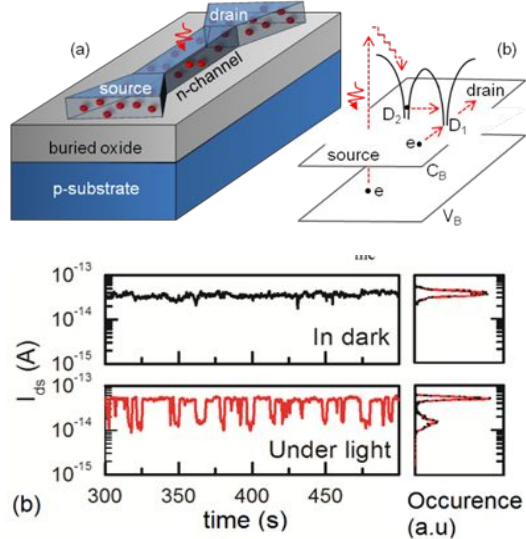


図7 . フォトンの吸収により生じるリンドナー原子の充放電に基づくランダムテレグラフシグナル (**APL (2011)**)。

(7) ドーパント原子検出・評価技術 :

我々は、本研究計画開始以前に極低温ケルビンプローブフォース顕微鏡 (LT-KFM) を立ち上げて、チャンネル中の 1 個のリンおよびボロンの電位分布の観測に成功していた (**APL (2008)**)。本計画では、さらに複数の近接するリンの電位分布と電子の逐次注入による変化を調べた。その結果、**図8**に示すように、電子注入に伴い、ポテンシャル井戸が順次消失することを見出した(**APL(2011)**)。これは、デバイス動作の基盤となる結果である。さらに、pn ダイオードに対して、ドーパントの充放電によるポテンシャル揺らぎが空乏層領域において観測され、pn 接合部ではキャリア捕獲と放出が定常的に生じていることを初めて直接観察した (**APL(2013)**)。

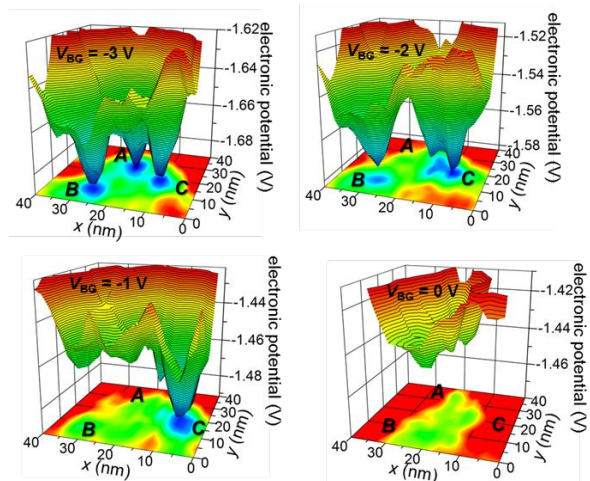


図8 . KFM によるチャンネル表面の電位像 (実測データ): 3 個のリンドナーに電子が順次トラップされてポテンシャル井戸が消失していく様子 (**APL (2011)**)。

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 33 件)

- 1) M. Tabe, H. N. Tan, T. Mizuno, M. Manoharan, L. T. Anh, H. Mizuta, R. Nuryadi, D. Moraru, "Atomistic nature in band-to-band tunneling in two-dimensional silicon pn tunnel diodes", Appl. Phys. Lett., 108, pp.093502-1-5 (2016). 査読有、DOI: 10.1063/1.4943094
- 2) A. Samanta, D. Moraru, T. Mizuno, M. Tabe, "Electric-Field-Assisted Formation of an Interfacial Double-Donor Molecule in Silicon Nano-Transistors", Sci. Rep. 5, 17377 (2015). 査読有、DOI: 10.1038/srep17377
- 3) D. Moraru, A. Samanta, K. Tyszka, L. T. Anh, M. Manoharan, T. Mizuno, R. Jablonski, H. Mizuta, M. Tabe, "Tunneling in Systems of Coupled Dopant-Atoms in Silicon Nanodevices", Nanoscale Research Letters, 10, 372-1-10 (2015). 査読有、DOI: 10.1186/s11671-015-1076-z
- 4) K. Tyszka, D. Moraru, A. Samanta, T. Mizuno, R. Jablonski, M. Tabe, "Effect of selective doping on the spatial dispersion of donor-induced quantum dots in Si nanoscale transistors", Appl. Phys. Express, 8, 094202-1-4 (2015). 査読有、DOI: 10.7567/APEX.8.094202
- 5) D. Moraru, A. Samanta, L. T. Anh, T. Mizuno, H. Mizuta, M. Tabe, "Transport spectroscopy of coupled donors in silicon nano-transistors", Sci. Rep. 4, 6219-1-6 (2015). 査読有、DOI: 10.1038/srep06219
- 6) L.T. Anh, D. Moraru, M. Manoharan, M. Tabe, H. Mizuta, "The impacts of electronic state hybridization on the binding energy of single phosphorus donor electrons in extremely downscaled silicon nanostructures", J. Appl. Phys. 116, 063705-1-9 (2014). 査読有、DOI: 10.1063/1.4893181
- 7) R. Nowak, D. Moraru, T. Mizuno, R. Jablonski, M. Tabe, "Potential Profile and Photovoltaic Effect in Nanoscale Lateral pn Junction Observed by Kelvin Probe Force Microscopy", Thin Solid Films, 557, 249-253 (2014). 査読有、http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2013.08.115
- 8) Mizuno, D. Hartanto, R. Jablonski, and M. Tabe, "Dopant-induced random telegraph signal in nanoscale lateral silicon pn diodes at low temperatures", Appl. Phys. Lett., 103, pp.243102-1-4 (2013). 査読有、http://dx.doi.org/10.1063/1.4841735
- 9) R. Nowak, D. Moraru, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, "Effects of deep-level dopants on the electronic potential of thin Si pn junctions observed by Kelvin probe force microscope", Appl. Phys. Lett. 102, pp. 083109-1-4 (2013). 査読有、http://dx.doi.org/10.1063/1.4794406
- 10) E. Hamid, D. Moraru, Y. Kuzuya, T. Mizuno, L. Anh, H. Mizuta, and M. Tabe, "Electron-tunneling operation of single-donor-atom transistors at elevated temperatures", Phys. Rev. B 87, pp. 085420 -1-5 (2013). 査読有、DOI: 10.1103/PhysRevB.87.085420 (第5回応物学会シリコンテク分科会「論文賞」受賞)
- 11) M. Hori, K. Taira, A. Komatsubara, K. Kumagai, Y. Ono, T. Tanii, T. Endoh, T. Shinada, "Reduction of threshold voltage fluctuation in field-effect transistors by controlling individual dopant position", Appl. Phys. Lett. 101, pp. 013503-1-3 (2012). 査読有、http://dx.doi.org/10.1063/1.4733289
- 12) E. Prati, T. Shinada, et al., "Anderson-Mott transition in arrays of a few dopant atoms in a silicon transistor", Nat. Nanotechnol., 7, 443-447 (2012). 査読有、DOI: 10.1038/NNANO.2012.94
- 13) M. Anwar, R. Nowak, D. Moraru, A. Udhiarto, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, "Effect of electron injection into phosphorus donors in silicon-on-insulator channel observed by Kelvin probe force microscope", Appl. Phys. Lett. 99, pp.213101-1-3 (2011). 査読有、doi: 10.1063/1.3663624
- 14) A. Udhiarto, D. Moraru, T. Mizuno, and M. Tabe, "Trapping of a photoexcited electron by a donor in nanometer-scale phosphorus-doped silicon-on-insulator field-effect transistors", Appl. Phys. Lett. 99, pp.113108-1-3 (2011). 査読有、doi: 10.1063/1.3637445

[学会発表](計 148 件)

(招待講演) 田部道晴, "ドーパントを介したトンネル電流の評価とデバイス応用" 電気学会ナノエレクトロニクス

新機能創出・集積化技術専門委員会，早稲田大学，(2016.3.9)

(招待講演) Michiharu Tabe, Daniel Moraru, Arup Samanta, Krzysztof Tyszka, Hoang Nhat Tan, Yuuki Takasu, Ryszard Jablonski, Le The Anh, Hiroshi Mizuta, Takeshi Mizuno “Effect of Individual Dopants in Nano-SOI-MOSFETs and Nano-pn-Diodes”, 228th ECS Meeting, Phoenix Convention Center, Phoenix, AZ, USA (2015. 10. 11-15)

(招待講演) 田部道晴，“少数個のドーパントを利用したSi ナノデバイス-ドーパントのパラダイムシフト” 電子情報通信学会 SNT 研究会，2015.2.5, 東京大学 本郷キャンパス 武田ホール (東京都・文京区)

(招待講演) エルファン ハミッド, ダニエル モラル, 葛屋陽平, 水野武志, レテアン, 水田博, 田部道晴，“ドナー原子トランジスタにおける電子トンネリングの高温動作”，2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会 第 5 回シリコンテクノロジー分科会論文賞受賞記念講演，2014.3.19, 青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県・相模原市)

(招待講演) Michiharu Tabe, Daniel Moraru, Earfan Hamid, Arup Samanta, Le The Anh, Takeshi Mizuno, Hiroshi Mizuta，“Dopant atom devices based on Si nanostructures”，7th International WorkShop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics, 2014.1.27, 東北大学 (宮城県・仙台市)

(招待講演) Michiharu Tabe，“Single-dopant-atom devices: dopant observation and tunneling operation at high temperatures”，II Bilateral Italy-Japan Seminar, 2013.4.29, Du Lac et Du Parc Grand Resort (Riva del Garda・ITALY)

〔図書〕(計 3 件)

Daniel Moraru and Michiharu Tabe，“Nanoscale Silicon Devices”，CRC Press，Eds: Shunri Oda and David K. Ferry, Chapter 8: “Dopant-Atom Silicon Tunneling Nanodevices”，(2015.12) pp.181-202.

Daniel Moraru, Michiharu Tabe, Springer, Toward Quantum Fin FET, Chapter 13 “Single-Electron Tunneling Transistors Utilizing Individual Dopant Potentials”，2013, 305-324.

M. Tabe, D. Moraru, and A. Udhiarto, “Single Atom Nanoelectronics, Chapter 13: Silicon-based single dopant devices and integration with

photons”，pp. 305-327, Eds: Enrico Prati and Takahiro Shinada, Pan Stanford Publishing, (2013).

〔その他〕

ホームページ等

静岡大学学術リポジトリ

<http://ir.lib.shizuoka.ac.jp/>

静岡大学電子工学研究所田部研究室

<http://www.rie.shizuoka.ac.jp/~nanohome/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田部 道晴 (TABE Michiharu)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：80262799

(2) 研究分担者

品田 賢宏 (SHINADA Takahiro)

東北大学・国際集積エレクトロニクス研究開発センター・教授

研究者番号：30329099

(3) 研究分担者

小野 行徳 (ONO Yukinori)

富山大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：80374073

(4) 研究分担者

水田 博 (MIZUTA Hiroshi)

北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・教授

研究者番号：90372458

(5) 研究分担者

MORARU Daniel

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：60549715

(6) 連携研究者

藤原 聡 (FUJIWARA Satoshi)

NTT・物性科学基礎研究所・上席特別研究員

研究者番号：70393759