

令和元年6月4日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14242

研究課題名（和文）決定論的ドーピング法に基づく単電子等価回路設計プロセスと確率的情報処理への応用

研究課題名（英文）Development of single dopant circuit by deterministic doping and application to stochastic processing

研究代表者

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、決定論的ドーピング法の注入元素の多様化を図り、単ドーパントが動作を支配する回路を開発すると共に、脳におけるパルス伝導・積和・閾値演算を量子効果により抽象化・具現化して、極低電力・並列機能演算を行う脳型量子回路を実現し、革新的情報処理システムの基盤構築を目指した。具体的には、決定論的ドーピング法による単ドーパント量子ドット形成プロセスを確立すると共に、ゲルマニウム-空孔複合体からなる新たな量子準位系の形成に成功し、室温動作の可能性を拓いた。加えて、熱ノイズやゆらぎを利用して動作する単ドーパントニューラルネットワーク回路を開発し、新たな情報処理デバイス・回路基盤を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、ドーパントに頼らないデバイス開発が主流の中で、従来のドーパント依存トランジスタの極限形として単ドーパントが制御されたデバイスに再び光を当てた点と、制御された単ドーパントが作る量子準位の創造に学術的意義がある。今回、単ドーパントに基づく新たな情報処理デバイス・回路が創出されたことで、小規模であっても自然・生物に学ぶ全く新しい情報処理システムの可能性が拓け、膨大な情報の中から、自ずと特徴を捉える学習型のコンピューティングの原理実証に一步近づく成果である。加えて、情報処理システム基盤として、圧倒的に高い信頼性を有するCMOSテクノロジーの裾野を拡大させる社会的意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aimed to increase the ion species in the deterministic doping method, develop a circuit in which a single dopant dominates the operation, and model processing in the brain with quantum effects. Then, by realizing brain-type quantum circuits that perform ultra-low-power, parallel computations, we aimed to establish a foundation for innovative information processing systems. Specifically, we established the single dopant quantum dot formation process by the deterministic doping method, and succeeded in forming a new quantum system consisting of germanium-vacancy complex, which is an achievement that enables room temperature operation. In addition, we have developed a single-dopant neural network circuit that operates using thermal noise and fluctuation for the first time, and built the basic technologies for exploring a new information processing device and circuit.

研究分野：半導体工学

キーワード：決定論的ドーピング 単ドーパント回路 確率的情報処理システム

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

1. 研究開始当初の背景

トランジスタの電気的特性を制御するために、長年、ドーパントが導入され、半世紀に渡って LSI とそれに立脚するエレクトロニクスの発展に寄与してきた。今日、ドーパント統計的ゆらぎに起因する特性ばらつきが本質的問題となり、ドーピングはもはや使えない、というコンセンサスが形成されつつあった。研究代表者等は、原子を 1 個ずつ注入可能な決定論的ドーピング法を世界に先駆けて開発に成功し、世界初となるドーパント規則配列を有する半導体を創製 (Shinada, *Nature* 2005) した他、ドーパントの 1 次元配列を実現し、量子輸送現象の観測 (Prati, Shinada, *Nature Nanotech* 2012) に成功し、研究分担者等は、非決定的な動作により情報処理を行なう脳型・生物的情報処理の計算モデルをいち早く構築 (Oya, Asai, *Chaos, Solitons and Fractals* 2006) してきた。これらの実績に基づき、原子レベルで制御された新しいデバイスとそれを可能にするプロセス実現の見通しを得て、IoT、自動運転といった新しい社会ニーズの新潮流の中で、単ドーパント回路を発想し、脳型・生物的情報処理システムとの融合を着想するに至り、本研究を提案した。

2. 研究の目的

本研究では、決定論的ドーピング法における元素の多様化を図ると共に、単ドーパント回路を開発して、革新的情報処理回路・システムの構築を目的とする。従来、ブール代数に基づく論理回路を、単電子回路を用いて設計する場合、CMOS の代わりに単電子回路を用いる積極的な理由が必要だが、回路構成(極低温または多数決処理) および CMOS との整合性に大きな電力効率オーバーヘッドが存在し、単電子論理回路の研究規模の縮小を招いていた (ITRS 2013)。これに対して、決定論的ドーピング法により“単電子”を“単ドーパント”に置換し、シリコン表面に選択的なドーピングを行い、任意の場所に量子ドット(量子準位)ネットワークを構成ことにより、ドーパント種で決まる量子準位の設計のみならず、これまで困難であったトンネル接合の“回路”を初めて構築することを目的とした。加えて、原理実証(POC)のみならず、大規模回路化に向けた問題点・課題についても明らかにすることを試みた。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、H28 年度～H30 年度の 3 年間で、以下の研究項目に取り組んだ。まず、研究協力者の谷井孝至教授(早稲田大学)の協力を得て、(1)決定論的ドーピング法において、新たな液体金属イオン源を開発し、注入可能な元素の多様化を図った。これを実現して、多様な単ドーパントが作るクーロンポテンシャルに基づく量子ドットを形成すると共に、量子ドットをトンネル接合で繋ぐプロセスモジュールを開発することとした。量子ドットの評価には、Enrico Prati 博士(CNR)の協力を得る。研究分担者の大矢剛嗣准教授(横浜国立大学)、浅井哲也准教授(北海道大学)の協力を得て、(2)脳型・生物的情報処理モデルに基づき、これまで実績のある単電子回路の“単電子”を“単ドーパント”に置き換えた単ドーパント回路を設計し、予想される回路特性や課題等を明らかにし、(3)単ドーパント回路特有の新情報処理システム探索に着手した。

4. 研究成果

本研究では、決定論的ドーピング法の注入可能な元素の多様化を図り、制御された単ドーパントが動作を支配する単ドーパント回路を開発すると共に、脳におけるパルス伝導・積和・しきいち演算を量子効果により抽象化・具現化して極低電力・並列機能演算を行う脳型量子回路の実

現を目的として、原子レベルでのプロセス、デバイス開発から回路・システムまで、階層に跨がるチームにより、革新的情報処理システムの基盤構築を目指した。

H28 年度

(1) 決定論的ドーピング法による単ドーパント量子ドット形成プロセスの開発

新たな液体金属イオン源を開発して、注入可能なイオン種の拡充を図った。具体的には、P、B 等に加えて、Ge、Er イオン注入が可能になった。更に、量子ドットネットワーク回路をシリコン表面状に自在に形成するためのプロセスを設計し、ドーパントの 2 次元配列、および任意のイオン注入パターン形成を可能にした。

(2) 量子ドットネットワーク単ドーパント回路の設計と構築

当初計画通り、実デバイスとして作製した素子から回路パラメータをある程度抽出し、プロトタイプシミュレータに導入した。一段階目として、実デバイスのパラメータに基づく簡単な回路を設計し、そのシミュレーションを実施、動作の確認に成功した。この設計回路は、実デバイスへの実装を想定したもの（実デバイスとしてのレイアウト案も構築する）とした。これにより、より現実に近いシミュレーションが可能になった。

H29 年度

(1) 決定論的ドーピング法による単ドーパント量子ドット形成プロセスの開発

シリコン - エルビウム系量子ドットを形成するために、シリコン中にエルビウムイオンと酸素イオンの同時注入を試み、エルビウム準位を介する光励起電流を初めて確認した。これにより、エルビウムが量子ドットとして機能することが確認できた。加えて、3 次元アトムプローブ法を用いて、エルビウム、及び酸素の分布を調査した結果、酸素が量子発光効率に大きな影響を与えている可能性を掴んだ。

(2) 量子ドットネットワーク単ドーパント回路の設計と構築

当初計画および平成 28 年度の実績を踏まえて、実デバイスのパラメータを反映させたプロトタイプシミュレータを開発した。具体的には、単ドーパントを量子ドットとする多数決論理ゲートを設計し、モンテカルロシミュレーションによって、正常動作確認を確認した。本研究成果は国際会議（IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop 2017）において発表し、本研究の有益性をアピールすることができた。

H30 年度

(1) 決定論的ドーピング法におけるゲルマニウム-空孔複合体量子準位系の形成

決定論的ドーピング法によりゲルマニウムを注入し、続く酸素イオン注入によって形成される新たな量子準位系「ゲルマニウム-空孔複合体」に着目し、密度汎関数法による電子状態計算を行った。その結果、バンドギャップ中に深い準位が形成されると共に、波動関数が局在化することで、室温において電子トラップとして機能することを初めて確認した。これにより、新たな量子準位系が設計可能となり、室温で単ドーパントに基づく量子輸送の可能性が拓けた。

(2) 量子ドットネットワーク単ドーパント回路の設計と構築

実デバイスのパラメータを反映させたシミュレーター開発を平成 29 年度のものから一段階進めた。具体的には、単ドーパントを量子ドットとし、トンネル接合を介してネットワーク化した単電子回路（単ドーパント回路）によるニューラルネットワーク回路を設計し、

モンテカルロシミュレーションによって、動作確認を行った。その結果、熱ノイズ、及びデバイスパラメータゆらぎを言わば味方に付けることで、正常な回路動作が得られることを確認した。これにより、単ドーパントに基づく量子ドットネットワークで、実用的な回路を構成できることが初めて明らかとなり、本提案の有益性を示すものである。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- [1] S. Achilli, N. Manini, G. Onida, T. Shinada, T. Tanii, and E. Prati, “GeVn complexes for silicon-based room-temperature single-atom nanoelectronics”, *Scientific Report*, 8, 180054, 2018. [査読有]
- [2] T. Tanabe and T. Oya, “Study of Single-electron Information-processing Circuit Mimicking Foraging Behavior of Honeybee Swarm”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 56, 06GF13 (2017). [査読有]
- [3] K. Satomi and T. Oya, “Design of Slime-Mold-Inspired Multi-Layered Single-Electron Circuit”, *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 34, 400 (2017). [査読有]
- [4] T. Tanabe and T. Oya, “Study of Single-electron Information-processing Circuit Mimicking Foraging Behavior of Honeybee Swarm”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 56, 06GF13 (2017). [査読有]

〔学会発表〕(計31件)

- [1] 倉田信彦, 大矢剛嗣, “シャボン膜の挙動を模倣した単電子デバイスの設計”, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 2019年3月, 東京.
- [2] 上野正暉, 大矢剛嗣, “学習機能を実装した単電子ニューラルネットワーク”, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 2019年3月, 東京.
- [3] 開出理砂, 大矢剛嗣, “熱雑音を利用する単電子メモリ対回路の設計と多数決論理ゲート応用”, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 2019年3月, 東京.
- [4] 山下秀人, 大矢剛嗣, “魚群に学ぶ単電子情報処理”, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 2019年3月, 東京.
- [5] N. Kurata and T. Oya, “Design of "bubble-Inspired Single-Electron circuit" Mimicking Behavior of Bubble Film”, *2018 International Symposium on Nonlinear Theory & Its Applications (NOLTA 2018)*, September 2018, Tarragona, Spain.
- [6] T. Oya, “Noise-Harnessing Nanodevices”, *2018 International Symposium on Nonlinear Theory & Its Applications (NOLTA 2018)*, September 2018, Tarragona, Spain.
- [7] 倉田信彦, 大矢剛嗣, “シャボン膜の挙動を模倣した単電子回路設計”, 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 2018年9月, 東京.
- [8] 鄭万輝, 大矢剛嗣, “パルス発生・伝搬場で表現するニューラルネットワーク”, 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 2018年9月, 東京.
- [9] T. Oya, and T. Shinada, “Study of noise- and fluctuation-harnessing single-dopant device”, *2018 Silicon Nanoelectronics Workshop*, June 2018, Hawaii, USA.
- [10] W. Zheng and T. Oya, “Design of neural network construction for pulse signal generating and propagating medium”, *2018 Silicon Nanoelectronics Workshop*, June 2018, Hawaii, USA.
- [11] 倉田信彦, 大矢剛嗣, “シャボン膜に学ぶ単電子情報処理”, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 2018年3月, 東京.
- [12] 大見俊介, 大矢剛嗣, “信号伝搬速度制御による新単電子ニューラルネットワークの開拓”,

第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年 3 月, 東京.

- [13] 鄭 万輝, 大矢剛嗣, “パルス発生・伝搬場におけるニューラルネットワーク”, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年 3 月, 東京.
- [14] 田鍋俊彦, 大矢剛嗣, “ミツバチの採餌行動を模倣した粗粒情報処理デバイスの設計”, 第 8 回分子アーキテクトニクス研究会, 2017 年 12 月, 愛媛
- [15] W. Zheng, F. Maehara, and T. Oya, “Study of Unique Neural Network on Pulse Signal Generating and Propagating Medium”, *30th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2017)*, November 2017, Korea.
- [16] T. Tanabe and T. Oya, “Design of Multi-Layer Single-Electron Information-Processing Circuit for Nonlinear Problem Mimicking Foraging Behavior of Honeybees”, *30th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2017)*, November 2017, Korea.
- [17] 清水 康雄, Y. Tu, アブデルガファ 愛満, 鈴木 雄大, K. Gi, 谷井 孝至, 品田 高宏, E. Prati, M. Celebrano, M. Finazzi, L. Ghirardini, 井上 耕治, 永井 康介, “シリコン中に共注入した酸素がエルビウム分布に与える影響”, 第 78 回応用物理学会学術講演会, 2017 年 9 月, 福岡.
- [18] 田鍋俊彦, 大矢剛嗣, “ミツバチの採餌行動を模倣した多層単電子情報処理回路の構築”, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年 9 月, 福岡.
- [19] T. Oya, T. Shinada, “Design of Majority Logic Gate for Single-Dopant Device”, *2017 Silicon Nanoelectronics Workshop*, June 2017, Kyoto, Japan.
- [20] Y. Shimizu, Y. Tu, A. Abdelghafar, M. Yano, Y. Suzuki, T. Tanii, T. Shinada, E. Prati, M. Celebrano, M. Finazzi, L. Ghirardini, K. Inoue, and Y. Nagai, “Atom Probe Study of Erbium and Oxygen Co Implanted Silicon”, *2017 Silicon Nanoelectronics Workshop*, June 2017, Kyoto, Japan.
- [21] E. Prati, M. Celebrano, L. Ghirardini, P. Biagioni, M. Finazzi, Y. Shimizu, Y. Tu, K. Inoue, Y. Nagai, T. Shinada, Y. Chiba, A. Abdelghafar, M. Yano, T. Tanii, “Revisiting room temperature 1.54um photoluminescence of ErOx centers in silicon at extremely low concentration”, *2017 Silicon Nanoelectronics Workshop*, June 2017, Kyoto, Japan.
- [22] T. Tanabe, T. Oya, “Design of single-molecule information-processing circuit mimicking foraging and information sharing behaviors of honeybees”, *The biannual International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE9)*, June 2017, Kanazawa, Japan.
- [23] 田鍋俊彦, 大矢剛嗣, “ミツバチの餌探索と情報共有行動を模倣した単電子回路の設計”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月, 横浜
- [24] 阿部祐吾, 大矢剛嗣, “コウモリに学ぶ単電子情報処理回路”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月, 横浜
- [25] 石橋 萌, 大矢剛嗣, “心筋細胞に学ぶ自動同期単電子回路”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 3 月, 横浜
- [26] M. Takano, T. Oya, “Study of performance improvement of single-electron associative memory circuit”, *Applied Nanotechnology and Nanoscience International Conference (ANNIC 2016)*, November 2016, Barcelona, Spain
- [27] K. Satomi, T. Oya, “Design of Slime-mold-inspired Multi-layered Single-electron-circuit”, *29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2016)*, November 2016, Kyoto, Japan
- [28] T. Tanabe and T. Oya, “Study of Single-electron Information-processing Circuit Mimicking Foraging Behavior of Honeybee Swarm”, *29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference*

(MNC 2016), November 2016, Kyoto, Japan

- [29] 里見航汰, 浅井哲也, 大矢剛嗣, “粘菌の挙動を模倣した情報処理手法の粗粒デバイスへの実装検討”, 第7回分子アーキテクトニクス研究会, 2016年10月, 福岡
- [30] 高野 誠, 浅井哲也, 大矢剛嗣, “単電子連想記憶回路の設計と粗粒デバイスへの応用検討”, 第7回分子アーキテクトニクス研究会, 2016年10月, 福岡
- [31] T. Shinada, E. Prati, T. Tanii, T. Teraji, S. Onoda, F. Jelezko, J. Isoya, “Deterministic doping to silicon and diamond materials for quantum processing”, 2016 IEEE 16th International Conference on Nanotechnology (IEEE NANO 2016), August 2016, Sendai, Japan

〔図書〕(計2件)

- [1] T. Oya, “Feasibility of Slime-Mold-Inspired Nano-Electronic Devices,” From Parallel to Emergent Computing, A. Adamatzky, S. Akl, and G. Ch. Sirakoulis, Eds, CRC Press, 2019
- [2] T. Shinada, E. Prati and T. Tanii, "Deterministic single-ion implantation method for quantum processing in silicon and diamond" in "Integrated Nanodevice and Nanosystem Fabrication - Materials, Techniques, and New Opportunities-" edited by Simon Deleonibus, Pan Stanford Publishing, 2017

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：大矢 剛嗣

ローマ字氏名：Takahide Oya

所属研究機関名：横浜国立大学

部局名：大学院工学研究院

職名：准教授

研究者番号(8桁)：30432066

(2)研究協力者

研究協力者氏名：浅井 哲也

ローマ字氏名：Tetsuya Asai

研究協力者氏名：谷井 孝至

ローマ字氏名：Takashi Tanii

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。