

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24710149

研究課題名(和文) 生体機能を模倣した単電子情報処理システム

研究課題名(英文) Study of new single-electron information-processing systems mimicking the behavior and functions of the living things

研究代表者

大矢 剛嗣(OYA, Takahide)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30432066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は「生体機能を模倣した単電子情報処理システムを構築すること」である。この達成のために、以下について検討をした。第一に、生体が持つ「雑音・揺らぎを吸収・利用する機能」の単電子デバイスへの実装、第二に、生体機能の中の「機能的情報処理能力」の単電子デバイス化、第三に、第一の内容と第二の内容との融合(最終目標)である。

研究成果として、細胞性粘菌の挙動/蟻の挙動/軍隊蟹の挙動/ニューラルネット模倣といった各単電子回路の実現可能性が高いことを見出したほか、雑音・揺らぎを利用することにより、信号伝搬速度の向上能力の発現/信号振幅の増幅能力の発現等の新現象を見出した。

研究成果の概要(英文)：The aiming goal of this study is development of new single-electron information-processing systems mimicking the behavior and functions of the living things. To achieve the goal, three topics were studied. The first was application of noise- or fluctuation-harnessing ability of the living things to the single-electron devices. The second was application of the functional information-processing ability to the single-electron devices. The third was merging those two functions together on the single-electron devices.

As results of this study, many useful bio-inspired single-electron information-processing systems have been proposed. Therefore, this study could reach the goal.

研究分野：生体・自然に学ぶ情報処理の単電子回路化

 キーワード：単電子回路 生体機能模倣 雑音耐性・利用 ゆらぎ耐性・利用 粘菌模倣回路 蟻の群行動模倣回路
 軍隊蟹の行動模倣回路 ニューラルネットワーク模倣回路

1. 研究開始当初の背景

近年ナノテクノロジー研究の目覚ましい発展により単電子回路をはじめとする量子デバイス/ナノデバイスによる次世代集積回路・Beyond CMOS デバイスの実用化が近付いてきた。しかしながらこのようなデバイスでは、揺らぎや熱雑音の要素に対して非常に敏感であり、動作エラーの要因となる。したがって、それらの要素は既存の半導体集積回路以上にシステム設計において悩ましい存在である。これまでに報告されている単電子回路システムは、正常動作を得るため揺らぎ・熱雑音を無視できるほどの極低温環境下 (= 揺らぎ・熱雑音の排除) でのみ動作させる、もしくはカーボンナノチューブなどの極微細デバイスを用いることで揺らぎ・熱雑音を排除するというものが大勢を占める。このような現状では大規模集積・極低消費電力をうたう量子デバイスであってもそれを冷却するエネルギーまで考えると省エネルギーにはならない。室温・揺らぎ/ノイズ環境下でも正常動作する量子デバイスが求められる。

一方、自然界にある情報処理システムに着目すると揺らぎや雑音を排除するのでは無く、むしろ積極的に活用している場合が多い。例えば生物の脳は日々ゆらぎや雑音の環境下にあっても正常動作をしている。さらには一部脳細胞が死んでしまうこと(電子デバイスにおける素子故障)があっても全く問題なく処理を行うことができる。また、脳内でバーストパルス信号の検出を行う神経ネットワークにおいて雑音を与えることによって出力ダイナミックレンジが大幅に向上することも明らかになっている。雑音を利用している他の神経ネットワークとして、雑音により非同期発火の神経細胞群が同期発火に移り変わる現象も報告されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は「生体機能を模倣した単電子情報処理システムを構築すること」である。単電子デバイスは次世代情報処理デバイス・Beyond CMOS デバイスの一つであり、電子を1個単位で扱うナノデバイスとして注目されている。しかし原理的に熱雑音や揺らぎに弱いことが知られている。一般的には作製プロセスの向上および極低温動作により問題の解決を目指す、本研究では生体の持つノイズ・揺らぎ吸収機能および利用機能に着目するという従来とは別のアプローチから解決を図る。さらには、未確立の単電子回路向けの情報処理アーキテクチャについて、生体の持つ情報処理機能に学ぶシステムの設計をし、単電子回路に適する手法であることを実証する。

3. 研究の方法

本研究の目的である生体機能を模倣した単電子並列情報処理システムの構築を実現

するために、次の3つのことを検討する。それは、(1)生体が持つ「雑音・揺らぎの吸収・利用能力」の単電子回路化、(2)生体の「機能的情報処理能力」の単電子回路化、(3)前述(1)および(2)の融合による最終目的の達成である。これまでの研究により得られた知見を基盤として、研究協力者(大学院学生)と共に平成24年度では(1)および(2)の基礎研究を並行して進める。並行して研究を遂行することは、(1)と(2)の研究内容についてある程度の独立性が保たれていることおよび研究協力者に適宜役割分担をするため可能である。平成25年度では(1)・(2)の基礎研究の結果を踏まえ大規模回路化やパラメータ最適化等を行い研究を進展させる。最終年度ではそれまでの基礎研究および発展研究を基に目標とするシステムを構築し理論解析や動作実証などを行い研究を完遂させる。

4. 研究成果

本研究の目的である生体機能を模倣した単電子並列情報処理システムの構築を実現するためには、大きく分けて以下の3つのことについて検討を行った。第一に、生体が持つ有益な機能の内「雑音・揺らぎを吸収・利用する機能」の単電子デバイスへの実装、第二に、生体機能の中の「機能的情報処理能力」を単電子デバイスによって実行すること、第三に、前述の「雑音・揺らぎ吸収/利用単電子デバイス」と「生体様情報処理単電子デバイス」との融合(最終目標)である。研究機関の間に、第一・第二の内容を突き詰めるに至った。結果として、細胞性粘菌の挙動/蟻の挙動/軍隊蟹の挙動/ニューラルネットワーク模倣といった各単電子回路の実現可能性が高いことを見出したほか、雑音・揺らぎを利用することにより、信号伝搬速度の向上能力の発現/信号振幅の増幅能力の発現等の新現象を見出した。さらに、生体に学ぶ雑音・揺らぎを利用するというものについては例えばニューラルネットワーク模倣回路に雑音利用能力を付与することで信頼度・パフォーマンスが高くなるものがあることを見出した。それぞれの研究に関して研究機関全体を通して英語論文誌に採択および国際会議・国内学会発表を実施することができた。

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 12 件)

H. Fujino and T. Oya, "Analysis of Electron Transfer Among Quantum Dots in Two-Dimensional Quantum Dot Network," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53, no. 6S, pp. 06JE02_1-06JE02_5 (2014). (査読有)
Y. Shinde and T. Oya, "Design of Single-Electron "Slime-Mold" Circuit

and Its Application to Solving Optimal Path Planning Problem," *Nonlinear Theory and Its Applications*, IEICE, vol. 5, no. 1, pp. 80-88 (2014). (査読有)
 S. Hayashi and T. Oya, "Collision-Based Computing Using Single-Electron Circuits," *JJAP*, vol. 51, no. 6, pp. 06FE11_1-06FE11_5 (2012). (査読有)

[学会発表](計 97 件)

1. 浜名良樹, 大矢剛嗣, "軍隊ガニの挙動に学ぶ単電子論理回路の構造検討," 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, (平塚), 2015 年 3 月 14 日.
2. 平島 諒, 大矢剛嗣, "熱雑音を利用する神経細胞軸索の単電子回路化と評価," 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, (平塚), 2015 年 3 月 14 日.
3. 里見航汰, 大矢剛嗣, "細胞性粘菌に学ぶ単電子情報処理回路," 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, (平塚), 2015 年 3 月 14 日.
4. 高野 誠, 大矢剛嗣, "単電子連想記憶回路の設計," 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, (平塚), 2015 年 3 月 14 日.
5. 高野 誠, 里見航汰, 浜名良樹, 平島 諒, 大竹央将, 小尾勇志, 大矢剛嗣, "単電子回路で実現するナチュラルコンピューティング," 第 10 回ナノテク交流シンポジウム, (横浜), 2015 年 3 月 6 日.
6. H. Otake, K. Ishimura, T. Asai, and T. Oya, "Signal Amplification by Circular Single-Electron Oscillator Network with Stochastic Resonance," 8th International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies (BICT 2014), (Boston, U.S.A.), 1/Dec., 2014. (査読有)
7. 大矢剛嗣, 浅井哲也, "ニューラルネットワーク動作をする Belousov-Zhabotinsky 反応," 第 5 回分子アーキテクトニクス研究会, (大阪), 2014 年 11 月 24 日.
8. 大竹央将, 石村憲意, 浅井哲也, 大矢剛嗣, "環状単電子振動子アレイにおける確率共鳴," 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, (札幌), 2014 年 9 月 17 日.
9. 小尾勇志, 大矢剛嗣, "単電子蟻情報処理回路の応用検討," 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, (札幌), 2014 年 9 月 17 日.
10. 濱名良樹, 今野和樹, 大矢剛嗣, "軍隊ガニの挙動に学ぶ単電子論理回路の設計," 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, (札幌), 2014 年 9 月 17 日.
11. 平島 諒, 大矢剛嗣, "熱雑音を利用するニューロン構造に学ぶ単電子信号伝搬の高速化," 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, (札幌), 2014 年 9 月 17 日.
12. H. Otake, K. Ishimura, T. Asai, and T. Oya, "Study of Stochastic Resonance in Circular Single-Electron Oscillator Array," 5th International Conference on Nanotechnology: Fundamentals and Applications (ICNFA'14), (Prague, Czech Republic), 12/Aug., 2014. (査読有)
13. H. Otake, T. Asai, and T. Oya, "Study of Single-electron DOMINO Logic Circuit," The 2014 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA'14), (Las Vegas, U.S.A.), 24/Jul., 2014. (査読有)
14. R. Hirashima, T. Asai, and T. Oya, "Study of Thermal-noise-assisted Signal Propagation of Neuromorphic Single-electron Circuit," The 2014 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA'14), (Las Vegas, U.S.A.), 22/Jul., 2014. (査読有)
15. Y. Obi and T. Oya, "Novel Single-Electron Information-Processing Circuits Mimicking Behavior of Ant Groups," The 2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2014), (Melbourne, Australia), 3/Jun., 2014. (査読有)
16. 藤野啓基, 大矢剛嗣, "単電子ネットワークを用いた熱雑音による信号検出," 2014 年 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, (淵野辺), 2014 年 3 月 17 日.
17. 大竹央将, 大矢剛嗣, "入力のズレを許容する単電子ドミノ論理回路設計," 2014 年 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, (淵野辺), 2014 年 3 月 17 日.
18. 小尾勇志, 大矢剛嗣, "アリの群行動に学ぶ単電子情報処理回路(3)," 2014 年 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, (淵野辺), 2014 年 3 月 17 日.
19. 今野和樹, 大矢剛嗣, "カニの群行動に学ぶ単電子情報処理," 2014 年 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, (淵野辺), 2014 年 3 月 17 日.
20. 濱名良樹, 大矢剛嗣, "カーボンナノチューブ複合紙によるペーパートランジスタを用いた組み合わせ論理回路の作製," 2014 年 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, (淵野辺), 2014 年 3 月 17 日.
21. 平島 諒, 大矢剛嗣, "熱ノイズを利用し

- た単電子信号伝送の速度向上," 2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会, (淵野辺), 2014 年 3 月 17 日.
22. 村上可諭, 黒瀧 大, 大矢剛嗣, "単電子 " 確率共鳴 " 回路の設計とゆらぎ利用能力評価," 第 4 回分子アーキテクニクス研究会, (東京), 2014 年 3 月 11 日.
 23. 藤野啓基, 大矢剛嗣, "熱雑音を利用する二次元量子ドットアレイによる信号検出," 第 4 回分子アーキテクニクス研究会, (東京), 2014 年 3 月 11 日.
 24. 大竹央将, 大矢剛嗣, "複合型単電子ドミノ論理回路とその入力のずれを調整する回路の設計," 第 4 回分子アーキテクニクス研究会, (東京), 2014 年 3 月 11 日.
 25. 小尾勇志, 大矢剛嗣, "単電子回路による蟻情報処理システム設計," 第 4 回分子アーキテクニクス研究会, (東京), 2014 年 3 月 11 日.
 26. 平島 諒, 大矢剛嗣, "熱雑音を利用する神経ネットワークに学ぶ単電子信号伝送の高速化," 第 4 回分子アーキテクニクス研究会, (東京), 2014 年 3 月 11 日.
 27. 平島 諒, 今野和樹, 大竹央将, 小尾勇志, 河村祐介, 藤野啓基, 村上可諭, 大矢剛嗣, "単電子ナチュラルコンピューテーション," 第 9 回ナノテク交流シンポジウム, (横浜), 2014 年 3 月 7 日.
 28. H. Fujino and T. Oya, "Analysis of Electron Transfer Among Quantum Dots in Two-dimensional Quantum Dot Network," the 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2013), (Sapporo, Japan), 8/Nov., 2013.(査読有)
 29. 村上可諭, 大矢剛嗣, "デバイスエラーを許容する二次元単電子振動子システムの評価(2)," 2013 年第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, (京田辺), 2013 年 9 月 20 日.
 30. 大竹央将, 栗山栄太郎, 大矢剛嗣, "単電子ドミノ論理回路におけるメモリの設計," 2013 年第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, (京田辺), 2013 年 9 月 20 日.
 31. 小尾勇志, 大矢剛嗣, "アリの群行動に学ぶ単電子情報処理回路(2)," 2013 年第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, (京田辺), 2013 年 9 月 20 日.
 32. 林 俊介, 大矢剛嗣, "Collision Based Computing を適用した単電子回路設計と評価," 2013 年春季応用物理学関係連合講演会, (厚木), 2013 年 3 月 28 日.
 33. 河村祐介, 大矢剛嗣, "雑音エネルギーを利用する単電子ブラウン・ラチェット回路の開発," 2013 年春季応用物理学関係連合講演会, (厚木), 2013 年 3 月 28 日.
 34. 藤野啓基, 大矢剛嗣, "量子ドット単電子ネットワーク内の電子移動解析," 2013 年春季応用物理学関係連合講演会, (厚木), 2013 年 3 月 28 日.
 35. 村上可諭, 大矢剛嗣, "デバイスエラーを許容する二次元単電子振動子システムの評価," 2013 年春季応用物理学関係連合講演会, (厚木), 2013 年 3 月 28 日.
 36. 大竹央将, 栗山栄太郎, 大矢剛嗣, "単電子ドミノ論理回路の応用展開," 2013 年春季応用物理学関係連合講演会, (厚木), 2013 年 3 月 28 日.
 37. 小尾勇志, 大矢剛嗣, "アリの群行動に学ぶ単電子情報処理回路," 2013 年春季応用物理学関係連合講演会, (厚木), 2013 年 3 月 28 日.
 38. 大竹央将, 小尾勇志, 河村祐介, 藤野啓基, 村上可諭, 林 俊介, 大矢剛嗣, "自然・生体に学ぶ単電子情報処理," 第 8 回ナノテク交流シンポジウム, (横浜), 2013 年 3 月 6 日.
 39. S. Hayashi and T. Oya, "Collision based Computing for Arrayed Single-electron Oscillators," the 25th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2012), 1P-7-44, (Kobe, Japan), 1/Nov., 2012.(査読有)
 40. 藤野 啓基, 大矢剛嗣, "単電子ネットワークにおける電子挙動の解析," 2012 年秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会, (松山), 2012 年 9 月 12 日.
 41. 村上可諭, 大矢剛嗣, "デバイスエラー補完二次元単電子振動子システム(2)," 2012 年 秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会, (松山), 2012 年 9 月 12 日.
 42. H. Fujino and T. Oya, "Study of stochastic resonance in a huge quantum dot network," SPIE NanoScience + Engineering, (San Diego, USA), 20/Aug., 2012.(査読有)
 43. Y. Murakami and T. Oya, "Study of two-dimensional, device-error-redundant single-electron oscillators systems," SPIE NanoScience + Engineering, (San Diego, USA), 20/Aug., 2012.(査読有)
- 〔その他〕
ホームページ等
<http://arrow.ynu.ac.jp/publication.html>
6. 研究組織
(1)研究代表者
大矢 剛嗣 (OYA TAKAHIDE)
横浜国立大学・工学研究院・准教授
研究者番号: 30432066

(2)研究分担者 ()

研究者番号：

(3)連携研究者 ()

研究者番号：