

研 究 報 告 書

「確率共鳴を利用した新しい情報処理のためのナノデバイスと集積化」

研究期間：平成19年10月～平成23年3月

研究者：葛西 誠也

1. 研究のねらい

【概要】

研究のねらいは、雑音などのゆらぎにより機能が向上する「確率共鳴」と呼ばれる現象(図1)を電子的に利用するための新しいナノデバイス(装置)と集積化技術をつくりだすことである。

確率共鳴は、生体が過酷な自然界で安定して機能する上で重要な役割を担っており、雑音やゆらぎに弱い情報エレクトロニクス(電子工学)に新しい展開をもたらす可能性をもっている。本研究では、半導体ナノワイヤネットワークを電氣的に制御する技術を駆使し、半導体上に現象を発現させ、これを情報エレクトロニクスに有用なハードウェアへと発展させる。

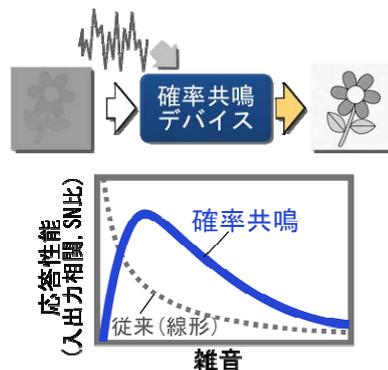


図1 確率共鳴現象と典型的な特性

【背景と研究状況】

確率共鳴は、1993年のザリガニの敵察知行動に見出されたのを契機に、視覚や聴覚あるいは姿勢制御など、ヒトを含め生体の様々な機能に関与していることがわかってきた。これ以降、確率共鳴の研究は生体分野を中心に進んだ。もともとは、地球での氷河期が10万年周期を持つことを説明するために1981年に考えだされた現象である。メカニズムは理解されており、電子回路や超伝導素子で人工的に現象が再現できることがわかっている。

確率共鳴を電子工学的に利用しようとするアイデアは想像に難くない。しかし、デジタル画像にわずかに雑音を混入させて階調を自然に見せる技術(ディザ)を除き、実用化された例は無い。理由は、①既存の技術と比較し際立って良い応答が得られない、②適切なデバイス(装置)が存在しないことの2点である。

【研究内容】

次の3つの要請を満たす、集積化可能な確率共鳴ナノデバイスと応用技術を創り出す。

- 要請1: 入力特定の値(しきい値)をこえたとき出力ができる、という特性をもつこと。確率共鳴を起こす必要条件である。
- 要請2: デバイスを並列化し加算ネットワークを構成できること。応答向上のため生体が採っている方法である。並列化数は多いほど応答は向上し、生体の神経系における並列化数は1000にもなる。
- 要請3: 小型で低消費電力動作であること。要請2を実践しようとする数が必要となるが、場所とエネルギーを費やすことになる。このデメリットを打ち消すためである。また、実用を考えると、室温動作、素子特性の設計と制御が求められる。

上記要請に基づき、本研究では実用化に近い「半導体ナノワイヤ電界効果トランジスタ(FET)」、および、究極の低消費電力動作を実現する「単電子デバイス」を取り上げ、現象の発現、解析と応用のための基礎技術について実験を主体とした研究を進めた。

2. 研究成果

(1) 半導体ナノワイヤ FET による確率共鳴の発現および理解と制御

1) 半導体ナノワイヤ電界効果トランジスタ(FET)を使い、確率共鳴を電子的に引き起こすことに成功した(図2)。

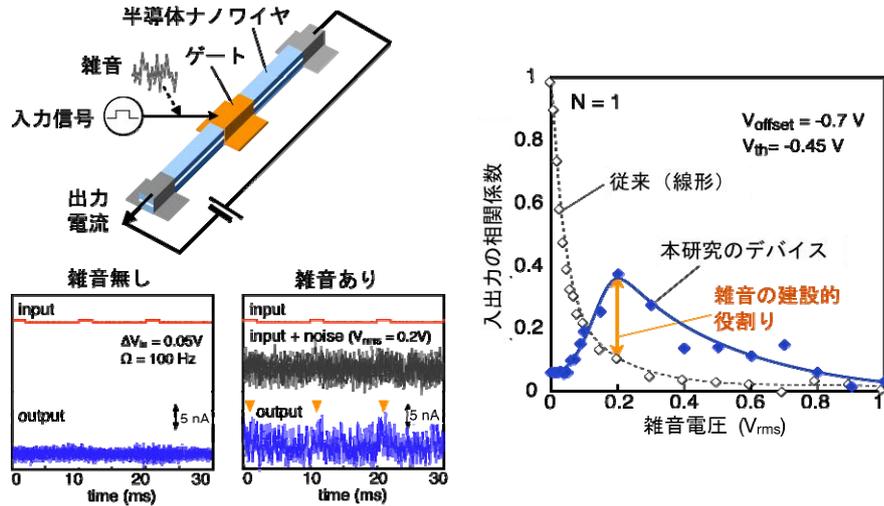


図2 ナノワイヤ FET と確率共鳴応答

トランジスタは、現代のエレクトロニクスにとって細胞のような役割をもった小さな装置で、さまざまところで大量に使われている(例えば、携帯電話では100億個)。しかも、入出力特性にきい値がある。半導体ナノワイヤはさらに極細の半導体の線で、神経の束のように並列に集積化ができる構造である。半導体ナノワイヤでトランジスタを実現すると、良好なきい値特性が得られ、確率共鳴を引き起こす上で有利である。以上の特徴は、目的で述べた条件を良く満たす。さらに、雑音がある中では従来技術である線形系よりも微小信号応答能力が高いことが示された。本研究のデバイスでは、雑音が建設的な役割を担うのである。

2) ナノワイヤ FET での確率共鳴に関する理論モデルをつくり、実験結果を説明した(図3)。

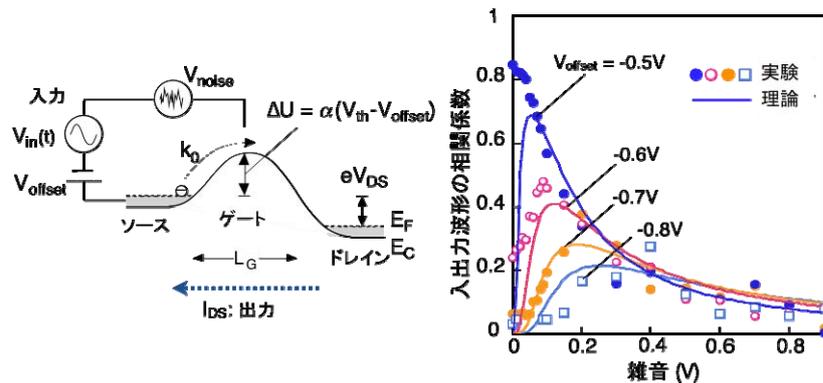


図3 ナノワイヤ FET の確率共鳴を説明するモデルと実験と理論の比較

理論は実験結果をよく再現する。トランジスタの構造サイズや半導体材料の性質(物性)と応答特性の関係を解明した。信号を入力するゲートのサイズを変えることで、応答のピーク位置などを制御できる。また、個々のトランジスタの応答を高めるにはどうすれば良いかも知ることができ、応答を設計することが可能になった。

(2) ネットワーク化による性能の向上

1) ナノワイヤ FET の並列加算ネットワークを構成することによって、確率共鳴応答が向上することを実証した(図4)。

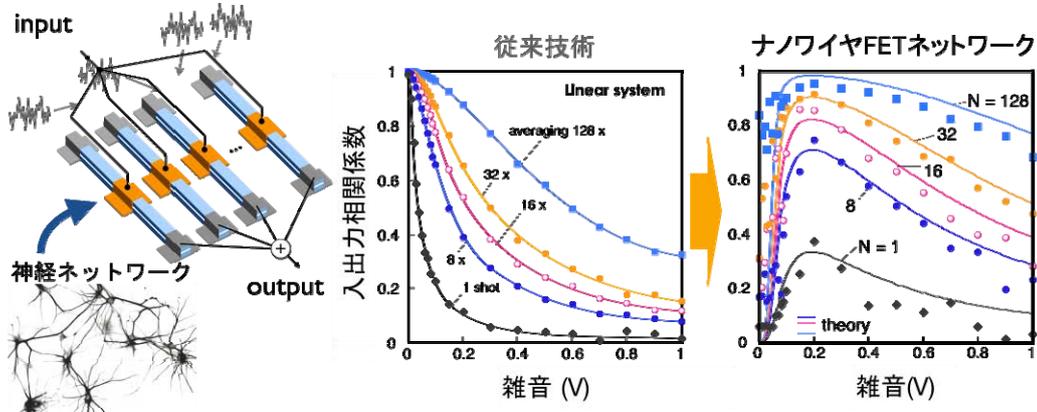


図4 ナノワイヤ FET ネットワークと確率共鳴

入力が相当ノジーであっても、このシステムは微小信号をとらえ出力することができるようになった。雑音の大きさが変わっても安定に応答できることもわかる。従来技術である加算平均化処理と比較すると、雑音下では確率共鳴の方が明らかに良い応答特性を示す。100個程度並列化すると、雑音の大きさが変動しても常に高い応答(相関値 >0.7)を維持できる。構成は本研究のほうが圧倒的にシンプルである。さらに、応答はリアルタイムであり速い。

2) 理論モデルによって、ネットワークの応答を説明した(図4中の実線)。理論式に基づき、要求応答性能(SN 比など)を実現するために必要な素子数を見積もることが可能になった。目安として、検出応用では1~10個、通信では10~100個、信号処理では1000~個である。

3) ネットワークを構成する FET のしきい値がばらついたときの影響を実験的に明らかにした。ばらつきは信号や雑音変化に対する適応や追従力の向上につながることを示した(図5)。

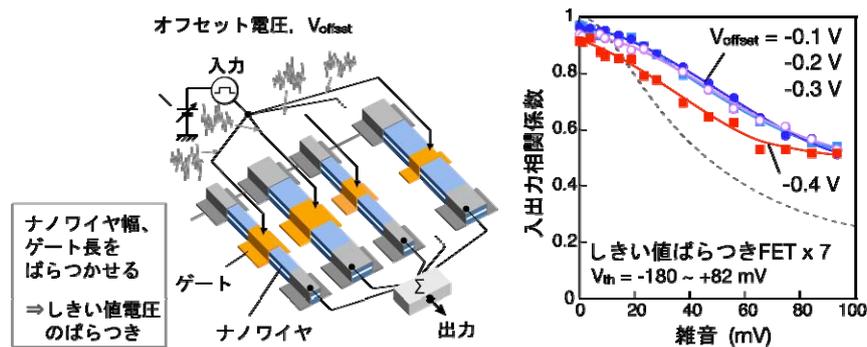


図5 しきい値ばらつきナノワイヤ FET ネットワークと確率共鳴応答

しきい値ばらつき FET ネットワークでは、入力信号の中心が大きくずれても、まったく応答曲線が変わらない。入力信号の変化に追従しているためである。また、雑音が 0 のときの応答が劇的に改善し、雑音なしでも応答できるようになった。しきい値がずれた FET を並列化した場合、入力がぶれてもいずれかのトランジスタが応答するためである(多重しきい値化)。

ここでは、ナノワイヤの幅やゲート長を変えることによって意図的にしきい値電圧をばらつかせている。先端集積回路の微細トランジスタは、同一設計であってもしきい値電圧がばらつく。これを逆に利用できる。

(3) 単一の電子が引き起こす確率共鳴の理論的証明と解析

1) 量子ドットを介して個々の電子が確率共鳴を起こすことを理論解析により証明した(図6)。

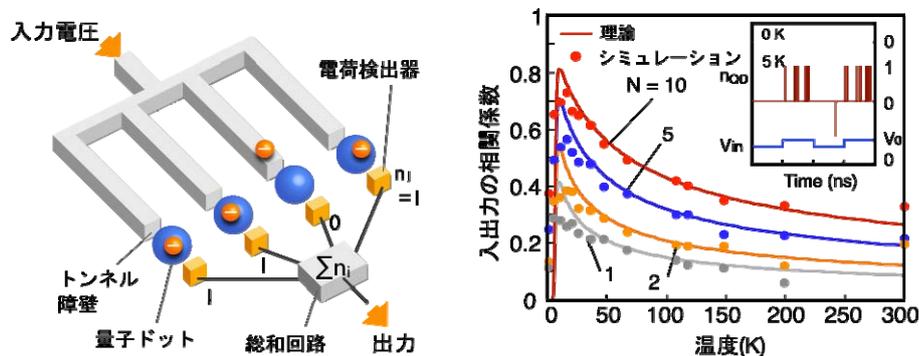


図6 量子ドットネットワークと単電子確率共鳴応答

解析式を導き、回路シミュレーションによって得られた特性を説明した。応答ピーク位置や高さについて、トンネル抵抗や接合容量などのパラメータと応答特性の関係を解明した。

また、量子ドット並列ネットワークにおける単電子確率共鳴では、要素ばらつきは平均化され、数を増すと均一ドットネットワークと区別がつかなくなることがわかった。この結果は、FETネットワークのばらつき効果と異なっている。理由は、電子が障壁を乗り越える場合と、通り抜ける(トンネルする)場合では遷移レートが異なるためである。

2) 単電子確率共鳴の実験実証のため、量子ドットと電荷検出トランジスタを集積した単電子計数システムを構築した。単電子計数ができることを確認した。

(4) 確率共鳴の電子工学的解釈

確率共鳴は、ランダムパルス密度変調と解釈できる。微小信号と雑音というネガティブな要素に、しきい値関数という単純機能を組み合わせ、高度な信号変調を実現している(図7)。

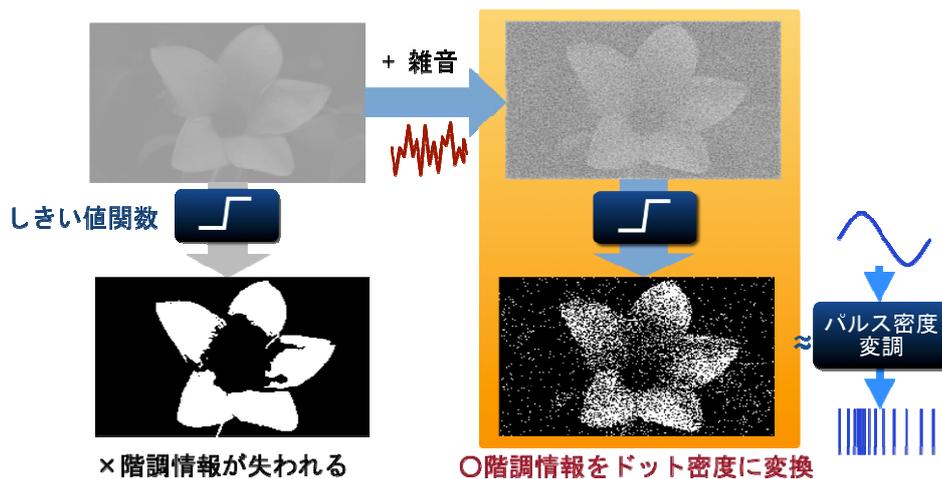


図7 確率共鳴における雑音の建設的役割

微弱な信号がもっていた振幅の大きさ(階調情報)が、パルスの密度に変換される。信号のデジタル化であり、アナログーデジタル変換(ADC)装置、あるいは1ビットオーディオの考え方によく似ている。並列加算ネットワーク化はADCのインターリーブ型オーバーサンプリングに相当し、より忠実に入力波形を再生する。

3. 今後の展開

(1) 確率共鳴の工学的応用のための要素技術開発

1) 理解の深化と精度の向上

系の非線形性の強さ確率共鳴応答特性(ピーク高さなど)との関係を明らかにする。しきい値がばらついた FET ネットワークについて、ばらつきの度合いとネットワーク応答曲線の対応を定量化する。これらは系の設計に不可欠である。

2) 適応性・追従性の獲得

さまざまな信号や雑音に対する適応性、および、これらの動的変化に対する追従性を実現する。実用的応用に必須である。ナノワイヤ FET の伝達特性の制御とネットワークの構成による応答の変化を理解し設計する技術を構築する。

(2) 新規確率共鳴デバイスの開拓

1) 単電子・量子デバイスと確率共鳴

熱ゆらぎと特性ばらつきにより実用化を妨げられてきたデバイスの復権について探る。ねらいは、少数電子操作による超低消費電力性を利用可能にすることである。

2) 生体機能の理解と応用

確率共鳴を切り口として、生体を実現している高い機能性と低エネルギー性の起源に迫り、エレクトロニクスに展開する技術を研究する。ナノワイヤ FET のように制御された人工系で生体の構成などを再現し、これを詳細に調べることで、生体機能の理解に寄与する。

(3) 応用展開

1) 特殊信号センシングへの応用

確率共鳴は、雑音が前提となる状況に加え、線形系が苦手とする信号に関する情報が無い、あるいは雑音に変化し予測できない場合に有効である。バイオセンシングなどである。また、量子デバイスの非線形性を用いた微小 THz 検出の感度向上や動作温度の向上への適用が挙げられる。

2) 生体工学への応用

生体の微小信号の検出に適用できるので、医学的な応用が期待される。また、単純なしきい値型センサであっても、巧く雑音を重畳することによって振幅情報をとりだせる。たとえば、脳波を非侵蝕で検出しコンピュータ上のカーソルを動かす場合、雑音を加えることにより動きがなめらかになる効果が得られる。BMI(Brain-Machine Interface)に有効である。

4. 自己評価

研究期間と規模に相応の成果が得られた。研究のねらいどおり、生物が過酷な自然環境の中で生き抜くために身につけた術をエレクトロニクスにやどすナノデバイスを開拓し、集積化による応答の向上を実現することができた。

当初計画課題については、ナノワイヤ FET での確率共鳴の実現やネットワーク化による応答向上といった中核部分はほぼ達成された。未達課題として、単電子確率共鳴の実験実証、素子間相関導入による応答制御であるが、いずれも現在進行中である。単純に当初計画に対する達成度のみで数値化すると70%程度である。一方、計画当初に予定していなかった成果が複数得られた。ナノワイヤ FET ネットワークが確率共鳴と関連現象の優れた実験プラットフォームとなったこと、現象およびそれを応用する生体機能性の理解の深化、ネットワークにおける物理ばらつきの効果の実験的解明などである。これらは今後研究を発展させる上で重要なものであり、上記未達分30%を補って余ある。

研究以外の成果も得られたことを付け加えておきたい。確率共鳴の認知の広がり、工学的応用の機運の高まり、企業や他研究機関との共同研究、さらにこれまで重なかった分野(分子、半導体、デバイス、通信、制御など)での横断的なコミュニケーションが始まったことなど、さきがけをきっかけとし分野として有意な動きが生まれた。

5. 研究総括の見解

葛西研究者の研究課題は、通常のエレクトロニクスでは嫌われ者である「雑音」やデバイス特性の「ゆらぎ」を逆手にとって、「確率共鳴」によって雑音や揺らぎを利用して、エレクトロニクスデバイスの機能向上を図ろうというものです。

それまで「確率共鳴」現象は生体機能性との関係でよく知られていたのですが、実証実験はほとんどありませんでした。葛西研究者は、この仮説を、ナノエレクトロニクスを用いて実証しようとしたのです。具体的には、半導体ナノワイヤネットワークを電氣的に制御する技術を駆使し、実際にノイズを加えて応答性がよくなることを半導体チップ上で実証しました。さらに、特筆すべきは、本質的にノイズやばらつきの影響をうけやすい「単電子デバイス」において、通常1ビットあたり10000電子以上が必要であるデバイスを並列化によって100電子程度に抑えられる可能性があり、超消費電力化への期待が高まるとともに、室温での単電子デバイスへ実現への端緒を築くものとなりました。

葛西研究者は、スピントロニクスのミニワークショップを齊藤研究者と共同提案したり、成果報告会を応用物理学会のシンポジウムとして行う時の企画者になったり、常に積極的に活動してくれました。研究成果のアウトリーチは、論文、特許出願、企業との共同研究のほか、JSTの動画サイト「サイエンスニュース」にも積極的に取り組んでくれました。本さがけ研究での成果がきっかけとなって、確率共鳴の国際的な研究コミュニティができつつあり、今後の発展が大いに期待でき、さがけならではの研究成果が得られたと評価します。

6. 主要な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

S. Kasai and T. Asai, "Stochastic Resonance in Schottky Wrap Gate-controlled GaAs Nanowire Field Effect Transistors and Their Networks", Applied Physics Express vol.1 (2008) article no.083001.
S. Kasai, T. Nakamura, S. F. Bin abd Rahman, and Y. Shiratori, "Study on Nonlinear Electrical Characteristics of GaAs-based Three-branch Nanowire Junctions Controlled by Schottky Wrap Gates", Jpn. J. Appl. Phys. vol. 47 (2008) pp.4958-4964.
S. Kasai, "Investigation on Stochastic Resonance in A Quantum Dot and Its Summing Network", International Journal of Nanotechnology and Molecular Computation vol.1, (2009) pp.70-79.
S. Kasai, K. Miura, and Y. Shiratori, "Threshold-variation-enhanced adaptability of response in a nanowire field-effect transistor network", Appl. Phys. Lett. vol. 96 (2010) article no. 194102.
S. Kasai, Y. Shiratori, K. Miura, Y. Nakano, and T. Muramatsu, "Control of stochastic resonance response in a GaAs-based nanowire field-effect transistor", physica status solidi (c) 採択、2011 夏公開予定

(2)特許出願

研究期間累積件数: 4件
発 明 者: 葛西 誠也
発明の名称: 信号再生装置
出 願 人: JST
出 願 日: 2008/2/29

発 明 者: 葛西 誠也

発明の名称: 信号再生装置 (PCT 出願)
出願人: JST
出願日: 2008/9/2

発明者: 葛西 誠也
発明の名称: 信号再生装置
出願人: 北海道大学
出願日: 2009/11/30

発明者: 葛西 誠也
発明の名称: 信号再生装置 (PCT 出願)
出願人: 北海道大学
出願日: 2010/11/26

(3) その他(主要な学会発表、受賞、著作物等)

招待講演

S. Kasai, "Stochastic Resonance Nanodevices for Fluctuation-Robust Electronic Systems (keynote lecture)", The Seventeenth Annual International Conference on COMPOSITES/NANO ENGINEERING (ICCE-17), Honolulu, USA (2009/7/26-8/1).

S. Kasai, "Stochastic Resonance Nanodevices Toward Fluctuation Cooperative Nanoelectronics (invited)", 2010 International Conference on Enabling Science and Nanotechnology, Kuala Lumpur, Malaysia (2010/12/1-3).

S. Kasai, "Stochastic Resonance and Related Phenomena in GaAs-based Nanowire FET Networks (invited)", The 2011 Villa Conference on Interaction Among Nanostructures (VCIAN-2011), Las Vegas, USA (2011/4/21-25).

葛西誠也、「確率共鳴の電子的利用を可能にする半導体ナノデバイス技術(招待講演)」、第58回応用物理学関係連合講演会、2011年3月24日-27日、厚木

葛西誠也、「雑音共存確率共鳴トランジスタ(チュートリアル講演)」、2011年電子情報通信学会総合大会、2011年3月14日-17日、東京

一般講演

S. Kasai, Y. Shiratori, K. Miura, H. Shibata, Y. Nakano, and T. Muramatsu, "THz Wave Detection by Gate-controlled GaAs Nanowire Devices", The 15th optoelectronics and communications conference (OECC2010) (2010/7/5-9).

著作物

葛西誠也、「ゆらぎや雑音と共存可能な新しい集積ナノデバイス(解説)」、計測と制御 vol49、No.4、pp.229-235.

受賞

S. Kasai, T. Nakamura, S. F. B. abd Rahman, and Y. Shiratori, 21st International Micropocesses and Nanotechnology Conference Outstanding Paper Award (2008).