

学 位 論 文 の 要 旨

高分子トランジスタを用いた内部ノイズを有するデバイスシステムにおける確率共鳴
(Stochastic Resonance in Device System using Polymer Transistor with Internal Noise)

氏 名 鈴木 喜晴 印

人工システムにおいて、ノイズはこれまで不要な存在であり排除すべき対象とされてきたが、逆にノイズを印加することによって、システムパフォーマンスが向上することがある。この現象を確率共鳴と呼ぶ。確率共鳴現象は生体の感覚神経系でも観測されており、生物が少ないエネルギーで高度な情報処理を可能としているのは、確率共鳴のように身の回りの環境や自身のノイズを有効に利用しているためであると考えられている。そのため人工デバイスに確率共鳴現象を利用することができれば、より省エネルギーな情報処理システムの構築につながると期待される。これまで、確率共鳴現象を実験的に観測した数多くの研究報告例があるが、その対象が生体・人工システムのいずれにおいても、外部からノイズを印加することによる観測であり、システム内部のノイズを利用した確率共鳴の研究例はほとんどない。そのため、新たに作り出したノイズではなく、すでにシステム内・外に存在するノイズを利用することはできていない。そこで本研究では、無機材料と比較して大きな内部ノイズを持つことが期待される有機高分子材料を用いた有機電界効果トランジスタ(OFET)を用いて、確率共鳴の挙動を調査する。電子デバイスの一つである OFET は非線形応答特性を示し、確率共鳴現象が起こり得る特性を持っている。さらに信号を一方向に伝達する機構を持つことから信号の逆流を防ぐことができ、ネットワーク化への拡張性も有している。しかし OFET は、移動度の向上が課題の一つであると言われており、電気特性における非線形性が小さくなる傾向にある。そのため OFET において確率共鳴現象が有効なのか確認を行う必要があると考えられた。そこで実際に OFET を作製し、外部からノイズを印加することによって確率共鳴現象が起こる条件を検討し、確率共鳴現象を確認することができたならば、OFET 特有の挙動はないか、内部ノイズが寄与していないか検証を行うことを本研究の目的とした。

第 1 章では、デジタル情報処理システムの更なる発展のために直面する問題点と、ノイズを利用した生物の確率共鳴現象について触れている。また確率共鳴と関連のある神経数理モデルや電子デバイスの先行研究についても述べている。そして OFET は、大きなノイズを持つ可能性があることを示し、確率共鳴現象の内部ノイズとして利用することを提案

している。

第2章では、確率共鳴現象の測定実験を行うための OFET を作製し、OFET の伝達特性における非線形性の向上および周波数特性の改善を試みた。作製した OFET は、トップゲートボトムコンタクト型構造であり、半導体層にレジオレギュラーポリ(3-ヘキシルチオフェン)[RR-P3HT]を、絶縁層にポリ(メチルメタクリレート)[PMMA]をそれぞれ用いた。OFET 特性の非線形性向上のために、RR-P3HT 薄膜形成時の温度を検討し、さらにチャネル外の RR-P3HT の除去を行った。また応答できる周波数帯域を広げるために、ゲート電極の幅を狭めた。また確率共鳴の測定時には、OFET の出力電流を電圧に変換するために、負荷抵抗と組み合わせたドレイン接地回路という形のデバイスシステムを用いるが、このときの負荷抵抗の値の検討も行った。

第3章では、作製した OFET の非線形応答性を用いて確率共鳴現象がみられるのか実験を行い、同時に数値シミュレーションも行った。このとき、OFET システムに外部ノイズを印加することによって、信号伝達パフォーマンスの向上がみられ、実験的に OFET において確率共鳴現象が発現したことが確認された。そして数値シミュレーションの結果から、OFET システムからの内部ノイズが寄与し、外部ノイズによる信号伝達性能の変動が小さくなっていたことが示唆された。また特性の異なる OFET を用いた実験によって、確率共鳴発現には OFET の非線形特性が関わっていることも確認された。

第4章では、第3章でみられた OFET システムの内部ノイズの特性を解析し、何由来のノイズであるのか特定を行った。内部ノイズの特性は、入力電圧に関わらずガウス分布になり、ホワイトなスペクトルとなっていた。このノイズ特性から熱ノイズであることが示唆されたが、ノイズ強度を計算したところ、OFET の絶縁体(誘電体)による静電容量が大きく関与した熱ノイズであると考えられた。

第5章では、内部ノイズの効果をより詳細に解析した。まず OFET システムの信号伝達パフォーマンスの指標として用いた、入力信号と出力信号間の相関係数の理論値を算出した。そして相関係数の内部ノイズ強度依存性と閾値依存性を確認したところ、類似点がみられ、内部ノイズが閾値として機能し、確率共鳴の発現に関与することが確認された。一方で、内部ノイズが大きく寄与したシステムは、閾値が主に寄与しているシステムと比較して、外部ノイズに対するシステムパフォーマンスの頑強性が確認された。このことから内部ノイズは、外部ノイズに対してロバストな閾値として働く可能性があることがわかった。このことから、内部ノイズの寄与が大きい OFET システムは、外部からの変動に対して比較的ロバストな信号伝達パフォーマンスを持ち得ると期待される。

“Stochastic Resonance in Device System using Polymer Transistor with Internal Noise”

Yoshiharu Suzuki

Noise has been treated as an unnecessary subject to eliminate in most cases in artificial systems. However, applying noise to these systems may improve its performance. This phenomenon is called stochastic resonance (SR). SR is observed in the sensory nervous system of biological systems. Moreover, it is suggested that biological system is capable of information processing with less energy consumption by utilizing environmental and/or internal noise. SR is one of phenomena found in such systems. Therefore, if SR phenomenon can be used for an artificial device, it is expected to lead to construction of more energy-saving information processing system. A lot of researches concerning experimental SR phenomenon both in biological and artificial systems have been reported, where noise was externally applied to the systems. However, there are few studies of SR using internal noise of a system. Therefore, artificially produced noise is used mostly, and noise existing inside or outside the system is not utilized to cause SR phenomenon. Thus, in this study, the author investigated the behavior of SR using organic field effect transistor (OFET) containing organic polymer materials, which is expected to possess large internal noise compared to inorganic materials. Because OFET, which is one of electronic devices, has nonlinear response characteristics to external stimuli, this system can occur SR phenomenon. Furthermore, since it has a mechanism for one-directional signal transmission, it is possible to prevent reverse flow of signals and therefore the OFET system has expandability to configure device networks. However, the improvement of charge carrier mobility in OFET is one of the issue, and nonlinearity in electrical characteristics of OFET tends to be small. From this reason, it is necessary to confirm whether the SR phenomenon is effective in OFET. In this study, the author fabricated OFETs using organic polymer materials and confirmed SR phenomenon in a fabricated OFET by applying external noise. Finally, the author investigated the unique behavior of SR in the fabricated OFET system, and verified the characteristic contribution of internal noise.

In chapter 1, the author addressed some problems faced for further development of digital information processing systems and the possible solution, which is based on SR phenomena of biological systems utilizing noise. The author also reviewed the previous researches on neural models and electronic devices related to SR. In addition, the author proposed that OFET is one of candidates as a device to induce SR phenomenon using internal noise.

In Chapter 2, the author fabricated various OFETs and tried to improve the nonlinear electrical characteristics and the frequency characteristics of the OFET in order to experimentally emerge SR phenomenon. The fabricated OFET had top-gate and bottom-contact

structure, using regioregular poly (3-hexylthiophene) [RR-P3HT] and poly (methyl methacrylate) [PMMA] as semiconductor and insulator, respectively. In order to improve the nonlinearity of the OFET transfer characteristics, the author changed the spin-coating temperature during the formation process of the RR-P3HT film, and mechanically removed the RR-P3HT film outside the channel. Next, to expand the responsive frequency band width, the width of the gate electrode was narrowed. Similarly, optimal value of a load resistance in the common-drain circuit of the OFET was evaluated, which was used during SR measurement to convert the output current of the OFET to voltage.

In chapter 3, we examined emergence of SR using the nonlinear response of the fabricated OFET, and also simulated the signal transmitting phenomena numerically. As a result, by applying external noise to the OFET system, the author observed increase in signal transmission performance. Namely, SR phenomenon was experimentally confirmed in OFET. From the result of the numerical simulation, it was suggested that internal noise in the OFET system contributed to SR behavior and reducing fluctuation of the signal transfer performance by the external noise. Moreover, from experiments using OFETs with different electrical characteristics, the author confirmed that the nonlinear characteristics of OFET was crucial to emerge SR phenomenon.

In Chapter 4, the author theoretically analyzed the characteristics of internal noise of the OFET system found in Chapter 3, and identified origin of this noise. The characteristic of internal noise had a Gaussian distribution and a white spectrum regardless of the input gate voltage. From this noise characteristic, it is suggested that internal noise in the OFET system is thermal noise. Furthermore, from the noise intensity it was considered that capacitance of the insulator (dielectric) layer of OFET was responsible for thermal noise.

In chapter 5, the effect of internal noise was analyzed in more details. First, the theoretical formulation of correlation coefficient between input and output signals, which was used as a fingerprint of signal transmission performance of the OFET system, was accomplished. Then, the author confirmed the dependence of correlation coefficient both on internal noise intensity and threshold of OFET characteristics. As a result, the similar characteristics were observed between internal noise and threshold, and it was presumed that internal noise has the same function as a threshold and therefore becomes alternative control parameter for emergence of SR. On the other hand, the system with more internal noise seems to be more robustness of system performance against variation of external noise intensity than the threshold system. From this, it was found that internal noise may work as a “robust threshold” against external noise. Conclusively, it is expected that OFET systems with large internal noise may have relatively robust signal transmission performance against external fluctuations, which are often unknown, unavoidable, and uncontrollable.