

氏 名	う え だ みち ひと 上 田 路 人
学位(専攻分野)	博 士 (情 報 学)
学 位 記 番 号	論 情 博 第 66 号
学位授与の日付	平 成 18 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学 位 論 文 題 目	Information Processing by Systems with Multi-stable States: Modeling and Fabrication of Devices (多安定状態を持つ系による情報処理：モデリングとデバイスの構築)
論文調査委員	(主 査) 教 授 宗 像 豊 哲 教 授 岩 井 敏 洋 講 師 石 田 謙 司

論 文 内 容 の 要 旨

2つまたはそれ以上の準安定状態間のジャンプや遷移を比較的低い励起エネルギーで実行できるとき、これらの状態のことを「多安定状態」と定義し、広い範囲からの工業応用を実証的に検討している。多安定状態の興味深い特性は、入力信号がある程度揺らぐような状況において、揺らぎ特性を情報処理へ応用することも、また場合によっては、その影響を抑制することも可能である点にある。本論文では、4つの事例についてその検討結果を報告している。

第1の応用例として、比較的古典的な双安定状態を用いる薄膜デバイスを提案している。この双安定状態は静電力とバネによる弾性力のバランスで得られるものであるが、この構造をもつ素子を半導体プロセス技術を利用して形成している。具体的には、中空に保持した梁構造を可動回折格子とし、電圧のオン・オフによる静電力変化で可動梁を上下に変位させる素子である。この素子を用いて炭酸ガス赤外レーザーの変調に成功している。さらに本素子を焦電センサのチョッパとして応用し、超小型焦電センサモジュールを構成し、静止した人体の検知にも成功している。

第2の応用例は、強誘電体材料の多安定状態を応用した薄膜デバイスである。強誘電体-常誘電体の直列キャパシタ構造は、電界の印加方向により中間電極の電位を正または負に不揮発保持できる。この電位を用いて回路状態を不揮発に切替・保持することを提案している。これにより未使用の回路ブロックの電源遮断と復帰が可能となり低消費電力化が期待できる。ワイヤリングにより素子を接続して提案回路を構成し、動作の検証を行い、少なくとも6,000秒間は回路情報が復帰可能であることを示している。さらに詳細な検討から、中間電極の電位の半減時間がおよそ1万秒であることを示すとともに、その支配要因が強誘電体キャパシタの緩和現象であることを明らかにしている。緩和現象は強誘電体薄膜の結晶性向上により改善が期待できる。

第3例として、準安定状態の遷移が雑音によって生じる系についての検討をしている。内部雑音を有する多くの閾値系が並列に配置され、各出力信号が足しあわされて全体システムの出力となる場合について、入力と出力の相関を評価した結果、閾値を最適に設定することにより、きわめて良好に入力信号が出力信号に再現されることを示している。また Collins らが導入した規格化されたパワーノルム (C1) という指標を用いて非周期的確率共鳴を評価した結果、C1 を最大にする閾値はガウシアンノイズの標準偏差の0.63倍であることを明らかにしている。この結果は、単純なセンサを多数集めることで、独立したノイズを受ける弱い信号でも検出可能であることを意味する。

最後に、閾値がランダムに変化する系による情報処理について検討している。一定入力に対して一様分布で閾値が揺らぐと、出力で1 (他の出力を0として) が発生する確率は入力電圧の大きさに比例する。このような閾値システム2つにおいて、閾値を同じ一様ノイズで揺らし、さらに各出力を排他的論理和 (XOR) に入力することでモジュールを構成すると、XOR 出力のパルス確率は2つの入力の差分絶対値を確率的に表す。このようなモジュールを多数並列配置して、マンハッタン距離を確率的に演算する素子を提案し、この素子をシミュレーションにより解析し、所望の動作を確認している。素子は、揺らぎ回数が増えるほど期待値に近づく特性を示すだけでなく、揺らぎ回数を増やさなくてもベクトルの次元数を増すほど期待値へ早く漸近するという特性も持つ。このことは、本素子が、莫大なベクトルの大まかなマッチング処

理において効率的であることを示すものである。

以上、本論文では多安定状態の系を用いた情報処理に関し4つの素子を提案しその性能を実証的に検討している。従来、主としてLSIに関連した情報処理が注目されてきたが、本研究は、多安定状態の系にはまだまだ多くの情報処理機能の可能性が存在することを示している。LSIの微細化がさらに進展し、熱雑音などの揺らぎが顕在化してくるこれからの時代には、「揺らぐ」多安定状態の活用は有用な技術分野であろう。

論文審査の結果の要旨

本論文は、多安定状態を持つ系による情報処理に関して、主にそのモデリングとデバイスの構築という視点から検討を行ったものである。いくつかの準安定状態間を比較的に低い励起エネルギーで遷移できる場合、これらの状態を多安定状態と定義し、その有用性と応用について、大きく4つの体系について報告している。

1番目は、マイクロマシン技術を用いた可動回折素子の提案で、機械的なバネの力と静電力とのバランスから構成される双安定状態の工業応用である。これを焦電センサ用チョッパとして応用し、実際に作製・動作検証を行って、静止した人体放射光の変調・検出に成功している。

2番目は、強誘電体の多安定状態を不揮発の回路切替へ応用した場合についての報告である。強誘電体-常誘電体という直列構造の中間電極が、電圧印加履歴に応じて電位を不揮発に保持できる特性を応用し、電源を遮断しても再度電源を投入すると元の情報を復帰できる回路を提案している。構成素子を配線接続して実験を行い、情報書込後6,000秒以上経た後でも、情報復帰を確認している。

3、4番目は閾値系という双安定状態がノイズで揺動される場合を検討している。まず3番目は、内部雑音を有する閾値系が多数並列に配置され、さらにこれらの和がシステム全体の出力となる場合について、最適な閾値設定で極めて良好に入力信号が出力に再現されることを示している。

4番目の研究では、一様分布で閾値が揺らぐ系で、出力が1（他を0として）となる確率は入力大きさに比例するという特性を応用したものである。これと排他的論理和を組合せて差分絶対値の演算を行い、さらにこれらを並列配置することでマンハッタン距離を確率的に演算する回路を提案している。この素子は、特にベクトルの次元数が大きくなるほど早く期待値へ漸近する特性が示され、莫大なベクトルの大まかなマッチング処理に効果的であり、これまでの素子とは違った側面が見られ興味深い。

LSIの将来に多くの課題が判明してきた昨今、多安定状態まで立ち返っての新規素子の検討は意味深い。特に多安定状態自体が大きく揺らぐ場合の問題は、素子の微細化などデバイスが将来必ず直面する問題への一つの解決方向を示すもので、揺らぎを逆に積極的に応用して情報処理を行うアプローチは非常に有用であると思われる。

よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成17年11月22日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。