

Integrated circuits employing Non-linear dynamics of coupled single-electron devices

(結合単電子デバイスの非線形ダイナミクスを利用した
集積回路に関する研究)

学位論文内容の要旨

本論文の目的は、次世代集積機能デバイス(量子デバイス)の物理的振る舞いおよび構造的特徴を積極的に利用し、新しい回路アーキテクチャの検討と実用につなげることである。

これまで、集積回路の高機能化・高性能化は基本素子であるトランジスタの微細化により進められてきた。しかし、素子の寸法が小さくなるにつれて量子効果や素子ばらつき(通常の回路動作にとっては望ましくない影響)が顕著になり、近い将来に微細化の限界が避けられないとも言われている。これらの問題点を解決するにはプロセス技術の向上により素子ばらつきの抑制、新しい材料の開発をもって量子効果を抑制する方法または設計の段階でエラー補正回路を組み込む方法が研究されている。その一方、量子効果を積極的に利用する研究も盛んに行われる様になり、CMOSに代わる次世代量子デバイスの候補として単電子デバイスが注目を浴びている。しかし単電子デバイスの動作は現用のCMOSデバイスと異なるため、従来の手法と異なる新しい回路構築方法(回路アーキテクチャ)と信号処理の方法を考える必要がある。また、国際半導体ロードマップ(ITRS)の最近の調査によれば、これからのLSIの高機能化・高性能化においてデバイス技術だけでなくアーキテクチャの技術革新の必要性が高まってきた。つまり、これまでのノイマン型アーキテクチャの延長上ではなく、デバイスそのものの特性を生かした回路設計手法が期待されている。本論文では微細化によって生ずる量子効果を排除するのではなく、積極的に利用した回路アーキテクチャを検討する。ここでは単電子デバイスに着目し、新しい回路構成及びアプリケーションを提案し、コンピュータシミュレーションにて動作確認を行う。

単電子回路はクーロンブロックードを利用して電子の輸送を一つ一つ制御し、極低消費電力で動作するLSIの基本素子として期待されている。さらに単電子デバイスの素子寸法は数ナノメートルオーダーとなっており、必然的に極低小面積な回路を構成することができる。多数の単電子素子を集積すれば空間的に高分解能な量子ドット集積体デバイスを実現することができ、センサへの新しいアプリケーションに応用できる。単電子デバイスは電子トンネリングにより、離散的な挙動を示す。また量子ドット上に抵抗体を堆積した単電子振動子素子は緩和振動を示し豊富な非線形ダイナミクスを有する離散力学システムといえる。基板上に集積された単電子デバイスの一つ一つを信号処理機能を持たせば新しい集積回路を組むことが可能である。本論文は上記の単電子回路の特徴・構造的特徴および豊富な非線形ダイナミクスを組み合わせた従来のLSI回路の枠を超える新しい集積回路開拓を行う。

本論文では、まず、単電子回路の非線形ダイナミクスを解析する。さらに多数の量子ドットを集積した、量子ドット集積体の構造的特徴および単電子デバイスの非線形性を利用した高空間分解能な2次元フォトン位置検出センサを提案し、その動作及び実用性をシミュレーションにて確認する。この様なセンサを構築する場合、多数の回路素子をマトリックス上の作成する必要がある。従来のCMOS回路で構成した場合、個々の素子の面積に加えて素子間の信号線を含めた回路全体の面積と消費電力が大きくなる。その上、一つ一つの素子の面積が大きいため、空間分解能が衰える。量子ドット集積体を使えば分解能の向上、消費電力の低減および回路面積を小さくすることが可能である。このようなセンサを実現するにはドットにおいて電子トンネルによって生ずる電位変化(信号)を読み出し、次段の素子に入力する必要がある。しかし、ドット間に信号線を設けることはプロセス上困難で、仮に可能だったとしても寄生容量により信号の検出が不可能である。そこで、集積体のドットを容量結合させて、相互結合を介してドット間に信号の伝達を実現する。集積体において、あるドットに対して外部入力(例えばフォトンの照射またはトリガパルスを入力)が与えられた場合電子のトンネルが誘起される。トンネルが生じた場合、容量結合を介して、そのドットから隣り合うドットへとトンネル事象が連鎖的に伝達される。トリガが入力されたドットを波源とするトンネリング事象波が他の量子ドットに向かって伝搬する。このようにドット間の信号の流れを巧みに利用すれば、高分解能なフォトンセンサや並列性処理能力の持つLSI回路を構築することができる。

次に、上記の信号処理手法一波の伝搬を拡張し、生物の持つ高い情報処理機能および構造に学んでLSI回路への応用を検討した。つまり、単電振動子を用いて、ニューロンにみられる発火現象および信号の伝達を模倣し、ニューラルネットワークをハードウェア化し、生物にみられる様々な情報処理機能に学んだ新しい回路アーキテクチャへの展開を行った。

本論文は次世代LSI機能デバイス、とりわけ単電子デバイスをいかに実回路へ結びつけるか、その回路構築方法とアプリケーションを検討した。特に単電子回路ネットワークを利用し空間的に高分解能のセンサを構築し、シミュレーションにて回路動作と実応用に展開可能であることを確認した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 雨 宮 好 仁
副 査 教 授 福 井 孝 志
副 査 教 授 高 橋 庸 夫
副 査 准教授 浅 井 哲 也

学 位 論 文 題 名

Integrated circuits employing Non-linear dynamics of coupled single-electron devices

(結合単電子デバイスの非線形ダイナミクスを利用した
集積回路に関する研究)

本論文の主旨は、単電子振動子ネットワークが示す非線形性を利用して信号処理を行う新しい集積システムの可能性を示したことにある。シリコン集積回路の進歩にともなう近年の微細加工技術の進歩により、これまで困難であった量子集積ナノ構造の製作が可能となった。それに対応して量子効果を積極的に利用する量子集積システムの研究も行われるようになり、MOS トランジスタ (MOSFET) による集積回路と並ぶ次世代集積システムの一つとして、とくに単電子素子の集積システムが期待されている。単電子素子は超高集積で極低電力、かつ特異で複雑な非線形特性を示すために、シリコン集積回路とは異なる新しい機能の集積デバイスが可能となるかもしれない。しかし単電子素子の動作は MOSFET とはかなり異なり、従来の集積回路の MOSFET を単に単電子素子で置き換えればよいわけではない。単電子素子による集積システムをつくり出すためには、素子だけではなく回路アーキテクチャにまで入って新しい信号処理方法を考えなければならない。

これらのことを踏まえて、著者は単電子素子による集積システムの構成方法を確立するための研究を行った。この研究は、集積システムの形態として単電子振動子を相互結合した集積ネットワークを取り上げ、それを舞台として現れる特異な非線形現象を信号処理に利用する、という方針で進められた。得られた成果は以下のとおりである。

(1) 単電子の非線形ダイナミクスの解析

単電子振動子ネットワークの非線形現象を把握するために、容量結合の振動子対および二次元ネットワークを取り上げて、その離散力学を解析した。それによって明らかになった非線形的な性質を挙げると、(a) 多周期振動の発生、(b) 初期状態に依存する複数アトラクタの発生、(c) 振動子ノード間の相互作用とトンネル事象の伝搬 (トンネル波の発生)、(d) 振動子のノード電位パターンからなる散逸構造の発生、などである。これらの非線形現象を利用することで新機能の集積システムを創成できることの可能性を示唆した。この結果をもとに、下記 (2) と (3) に示す単電子集積システムを提案した。

(2) 単電子振動子ネットワークのトンネル波を利用したフォトン位置検出システム

単電子振動子ネットワークの性質を利用して入射フォトンの二次元位置検出を行う集積デバイスを提案した。従来は入射フォトンの二次元位置を検出するデバイスとしてマイクロチャンネルプレート(光電子増倍管の二次元集積体:以下 MCP)が使われている。MCPの検出精度はその空間分解能で決まるが製作プロセスの制限により $10\ \mu\text{m}$ 以下にすることは困難である。そこで本研究では、単電子振動子ネットワークにより高空間分解能なセンサを実現することを提案した。このセンサは、正負交互にバイアスされた単電子振動子ネットワークからなる。空間分解能を $0.1\ \mu\text{m}$ 以下にすることができる。フォトンが入射してネットワーク内の振動子の一つに当たると、そのクーロンブロックが破れて電子トンネルが発生する(フォトン誘起トンネリング)。そのため振動子のノード電位が変化し、それが隣接する振動子のトンネル事象を誘発する。このトンネル波はネットワーク全体には波のようにネットワーク全体に拡がってセンサの周縁に到達する。トンネル波が周縁に到着する時刻を観察することで波の発生場所(フォトンの入射位置)を知ることができる。以上の着想のもとに具体的なデバイス設計方針を開発し、プロトタイプデバイスを例として計算機シミュレーションによりフォトン位置検出の動作を確認した。

(3) 生物の信号処理機能に学んだ単電子振動子ネットワークシステム

単電子素子の非線形性を利用して生物のもつ高い機能を模倣するための信号処理アーキテクチャを考えた。ここでは比較的によくみが明らかとなっている網膜の輪郭検出と動き検出の動作を単電子振動子ネットワークでコンパクトにハードウェア化する方法を提案した。これを具体的な回路とするときには「デバイス特性バラツキ」と「環境(熱)雑音」が問題となるが、これらを排除するのではなく、逆に利用して処理能力の向上につなげる方法を考えた。パルス密度変調にもとづいてノイズを活用しながら輪郭検出と動き検出を行う単電子振動子ネットワークの網膜回路を設計し、ノイズ利用によりSN比や動作精度が向上することを計算機による動作シミュレーションで確認した。

以上を要するに、著者は単電子振動子ネットワークが示す非線形現象を解析し体系化するとともに、その非線形現象を利用して新しい機能の集積システムを創成することの見通しを得たものであり、集積回路工学に貢献するところ大なるものがある。したがって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。