

学 位 論 文 題 名

二分決定グラフにもとづく量子効果デバイスの研究

学位論文内容の要旨

集積エレクトロニクスにおける目標の一つは、既存LSIとは異なる手法で情報処理を行う次世代の集積回路を開拓することにある。そのためには、トランジスタとは別の方法で論理動作を行う新しい機能デバイスを開発しなければならない。微細化限界にまもなく直面するLSI開発研究のブレイクスルーとして、それは重要なアプローチである。そのための研究方針として、従来とは異なるデジタル関数表現のデバイス化を考えることが望ましい。トランジスタによる論理設計は、主にブール代数式による関数表現にもとづいて行われてきた。ここでは新しい機能デバイス開発のため、デジタル関数を二分決定グラフ (Binary Decision Diagram : BDD) で表現し、その表現法に適した物理現象を用いてインプリメントすることを考える。

二分決定グラフは有効グラフによるデジタル関数の表現法の一つであり、コンピュータを使った論理設計のためのツールとして開発された。二分決定グラフを用いると多くのデジタル関数を簡潔に表現することができる。したがって、二分決定グラフにもとづいて論理回路を構成することにより、簡潔な回路設計が可能になる。さらに、論理回路を構成するための単位デバイス (BDDデバイス) の基本動作は、単純な二分岐スイッチであり、デバイス構成には入力に従って信号媒体の転送方向を切り替えることができる様々な物理現象を利用できる。なかでも量子効果を利用して実現するデバイスは、低消費電力・超微細化の要望に合致し、次世代集積デバイスの可能性を産むことが期待できる。

本論文では二分決定グラフを実際のデバイスで実現する、という新しいアイデアを提案し、さらに量子効果と結びつけることにより新しい機能を持つデバイスの構築を試みた。量子効果として、単電子の輸送現象を利用した構成と、単電子と互いに双対関係にある磁束量子の転送を利用した構成について考えた。いずれも転送による信号の減衰がなく、ソリトンの挙動を示すため、転送によって論理をおこなうデバイスに適合している。

結果として、単電子形のBDDデバイスを用いて、大規模回路にも適用できる単電子回路の設計方針を確立することができた。これまで、単電子デバイスによって任意の大きな論理回路を実現することは難しいと考えられてきたが、二分決定グラフと単電子の輸送を結びつけることによって原理的に実現可能であることをシミュレーションにより明らかにした。また、磁束量子形のBDDデバイスを用いた論理回路では、高速な論理回路が可能であることをシミュレーションで示し、効率的に論理回路を構成する手法について示した。

本論文は6章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第1章では、本研究の歴史的背景と目的を述べ、各章の概要を記した。

第2章では、デジタル関数表現法の一つである二分決定グラフについて、論理関数の表現方法やグラフの作成方法の簡単な説明を行なっている。さらに、論理関数の効率的な表現手法についても述べている。

第3章では、二分決定グラフのデバイス化の概念を述べ、論理回路を構成する場合の単要素となるBDDデバイスの機能について述べている。BDDデバイスの実現には様々な物理現象の利用が可能であり、利用する現象に応じた特徴をもつデバイスを構成することができる。いくつかの構造例を示し、その特徴を述べた。

第4章では、単電子トンネル現象を利用したBDDデバイスの構成方法について説明し、論理回路を構成する方法について述べている。また、トンネル接合とキャパシタと電源から成る単電子回路を解析するため、単電子現象の物理と単電子回路解析シミュレータのアルゴリズムについても説明している。例として、基本論理回路や組み合わせ論理回路を設計し、その動作をシミュレーションによって確認した。また、サブシステムのような大規模回路も同様に設計できることを示した。さらに、実際の回路動作に影響を与える諸現象について述べ、シミュレーション上で誤動作確率を見積もった結果を示した。

第5章では、磁束量子を利用してBDDデバイスを構成することを述べている。磁束量子を利用したBDDデバイスでは、共有形BDDなどの効率的な論理設計が可能であり、二分決定グラフの特長をより活かした構成が実現できる。いくつかの論理回路を例にあげ、シミュレーションにより設計した回路が正しく動作をおこなうことを確認した。磁束量子やその転送原理、BDDのスイッチ動作の原理などを説明するため、ジョセフソン効果についての簡単な説明も行っている。

第6章では本論文の結論と今後の課題について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 雨 宮 好 仁
副 査 教 授 長 谷 川 英 機
副 査 教 授 福 井 孝 志
副 査 教 授 宮 永 喜 一

学 位 論 文 題 名

二分決定グラフにもとづく量子効果デバイスの研究

集積エレクトロニクスにおける目標の一つは、既存LSIとは異なる手法で情報処理を行う次世代の集積回路を開拓することにある。そのためには、トランジスタとは別種の方法で論理動作を行う新しい機能デバイスを開発しなければならない。現状のLSI開発はまもなく微細化限界に直面することが予想されるので、その先のブレークスルーを築くために、新しい機能デバイスの開拓は重要な研究課題である。

本論文では、新しい機能デバイスを創り出すための方針として、従来と異なった論理表現法の利用に着目した。従来のLSIは「ブール代数式による論理表現をトランジスタでハードウェア化する」という考えにもとづいている。それに対して著者は「二分決定グラフによる論理表現を量子効果デバイスでハードウェア化する」という新しい概念を提案し、理論解析により新しい次世代の集積回路が構築可能であることを示した。

二分決定グラフとは有向グラフによるデジタル論理関数の表現法の一つであり、論理を構成するための単位機能が単純な二分岐転送、という特徴をもつ。したがって、トランジスタに利用できない物理現象であっても、二分決定グラフの形式ならば論理構成に利用できる可能性がある。そして適切な物理現象を利用することで、低消費電力と超高集積化に適した集積デバイスを創り出せる可能性がある。

本論文では、二分決定グラフによる論理表現と量子物理現象と結びつけることにより新しい機能を持つ集積デバイスの構築を試みた。有望なデバイス構造として、単電子の輸送現象を利用した構成と、それに類似した磁束量子転送現象を利用した構成を提案した。それぞれ1個の電子と1個の磁束量子を二分岐転送して論理動作を行う。いずれも転送に必要な回路構成が単純であり、しかも転送に要する電力が微小なので、二分決定グラフにもとづいて論理をおこなうデバイスに適合している。

本論文による研究の結果、二分決定グラフにもとづく単電子論理回路と磁束量子論理回路の構成方針が明らかとなった。さらに、大規模システムにも適用可能な回路設計手

法を確立することができた。従来は単電子現象や磁束量子現象を用いて規模の大きい論理システムを構成することは難しいと考えられてきた。しかし、本研究により、二分決定グラフとの組み合わせによれば低消費電力の大規模集積システムが原理的に構成可能であることが判明した。あわせて、今後の研究展開に参考となる種々の知見も明らかとなった。

これを要するに、著者は二分決定グラフによる論理表現を量子効果デバイスでハードウェア化するという新しい概念を提案し、さらに単電子輸送現象と磁束量子転送現象を利用した実際の論理システムの構成方針を明らかとしたものであり、次世代集積回路の開拓研究に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。