



Title	単電子回路シミュレーション技術に関する研究
Author(s)	桐原, 正治
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/41426
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏名	桐原正治
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第14683号
学位授与年月日	平成11年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科電子工学専攻
学位論文名	単電子回路シミュレーション技術に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 谷口 研二 (副査) 教授 濱口 智尋 教授 吉野 勝美 教授 尾浦憲治郎 教授 西原 浩 教授 森田 清三 教授 福西 宏有

論文内容の要旨

本論文は、単電子回路シミュレーション技術に関する研究の成果をまとめたものであり、本文は5章で構成されている。

第1章では、単電子素子の特徴と問題点、そして本研究の主題である単電子回路シミュレーションの背景について述べた。

第2章では、単電子素子と既存素子を組合せたハイブリッド回路のシミュレーション方法について説明した。マスター方程式法およびモンテカルロ法の単電子回路シミュレータを既存素子回路シミュレータ SPICE と連携させる方法について述べた。マスター方程式法では連携に必要な物理量が解析的に求めることができ、そのまま SPICE に組み込むことができた。モンテカルロ法ではトンネル間隔時間の間一定の電流を仮定したモデルを導入して SPICE との融合を図った。特性計算で、ゲート非同期電流素子で大負荷容量の場合はマスター方程式法、ゲート同期電流素子や小負荷容量のゲート非同期電流素子の場合はモンテカルロ法が適していることがわかった。また、単電子素子を CMOS インバータや CMOS 差動アンプに接続したハイブリッド回路の特性計算を行った。その過程で単電子素子だけでなく SPICE 側にある既存素子のモデリングも重要であることがわかった。

第3章では、非対称型ターンスタイルとそれを用いたカウンター回路、それを応用した回路を提案した。非対称ターンスタイルは電荷の移動に方向性があるため、入力が High レベルの個数を数えるカウンター回路が簡単に構成できた。カウンター回路はノイズ除去を行う画像処理回路に応用できた。XOR 回路とインバータ、メモリと組合せて Winner-Take-All 回路に、非対称型ターンスタイルとメモリ、AND 回路と組合せてニューロン回路に発展させることができた。

第4章では、単電子インバータを応用したニューロン回路を提案した。ニューロンモデルは荷重係数積算部、総和部、非線形関数部から構成されるが、荷重係数の記憶は二つのターンスタイルからなり、既存素子による記憶回路より素子数を大幅に削減することができた。積算は単電子インバータを改良して用いた。総和はキャパシタカップリング、非線形関数は単電子インバータで構成した。その結果、回路全体は電圧で制御するため消費電力が非常に低く抑えられ、また単電子素子という微細素子を用いるため高集積化が期待できた。

第5章では、本論文の内容をまとめ、結論とした。

論文審査の結果の要旨

微細化限界が言われている MOSFET に代わる次世代素子として、微細化により性能が向上する単電子素子が注目されている。単電子素子は超低消費電力素子である一方で、低電圧増幅率や低電流駆動能力といった、集積化の上の問題がある。この問題の解決方法として単電子素子と既存素子とを融合するハイブリッド回路が提案されている。本論文の前半部分では、ハイブリッド回路の設計、製造で重要となるシミュレータの開発についてまとめている。また後半部分では、単電子カウンター回路や単電子ニューロン回路といった、既存素子にない単電子素子の特色を生かした新しい回路の提案およびその動作特性の解析についてまとめており、単電子素子の発展に重要で新しい知見を得ている。

ハイブリッド回路シミュレータ開発において、以下のことが新たに提案され明らかにされている。

- (1) 単電子素子回路の特性計算をする方法としてマスター方程式法とモンテカルロ法がある。既存素子回路シミュレータ SPICE と融合する場合、マスター方程式法では解析的な計算により必要な物理量が算出できるが、モンテカルロ法では、トンネル間隔時間に一定電流が流れるモデルを導入して計算を可能にしている。
- (2) ハイブリッド回路計算において、単電子トランジスタといったゲート非同期電流素子で負荷容量が大きい場合はマスター方程式法が適しており、負荷容量が小さい場合およびターンスタイルといったゲート同期電流素子の場合はモンテカルロ法が適していることを明らかにしている。
- (3) ハイブリッド回路の特性計算において、Berkeley SPICE では問題が残っているものの SILVACO 社 Smart Spice ではシミュレータの融合に成功しており良好な結果が得られている。このことから、既存素子のモデリングの重要性を指摘しており、更なる改良へ向けての指針を明確にしている。

単電子カウンター回路と単電子ニューロン回路について、以下のことが提案され明らかにされている。

- (1) 電荷移動方向を一方向にすることができる非対称ターンスタイルを提案し、所望の動作に必要な容量値を算出している。次にその非対称ターンスタイルを用いたカウンター回路を提案している。このカウンター回路を、画像処理回路、Winner-Take-All 回路、ニューロン回路に応用した例を示している。
- (2) 非対称ターンスタイルのシミュレーションによる動作確認のほか、クロックマージン、温度およびゲートクロック周波数依存性について解析しており、その動作範囲を明らかにしている。
- (3) 単電子ニューロン回路の提案において、ターンスタイルを用いた荷重係数メモリは素子数が少なく非常に小さいため、既存素子によるメモリより高集積化が期待できる。また、積算回路は単電子インバータを用い、シミュレーションによる動作特性から所望の動作が得られることを明らかにしている。

以上のように、本論文は単電子素子と既存素子とのハイブリッド回路のシミュレータ開発および単電子カウンター回路と単電子ニューロン回路の提案において価値ある知見を得ており、電子工学の分野に貢献するところが大きい。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。