

## 論文の内容の要旨

論文題目 Modeling and Simulation of Single-Electron Devices and Circuits

(和訳: 単一電子デバイス及び回路のモデリングとシミュレーション)

氏名 天川 修平

単一電子エレクトロニクスに関する研究は特に単体デバイスレベルでの研究が理論と実験の両面から活発におこなわれている。これに対し、単一電子デバイスでシステムを構築する可能性を探るためにはシミュレーションが必要不可欠である。本研究は単一電子デバイスの応用を念頭におき、単一電子デバイス及び回路のシミュレーション技術と、それに関連する物理について検討をおこなったものである。

単一電子デバイス・回路のシミュレーションをおこなう上で重要な要素として、トンネリングレートの計算がある。これは、一般的にはトンネル接合が一定のトンネル抵抗を持つものと仮定して計算されている。より正確には、量子力学的にトンネル電流を計算すればよい。しかしながら、単一電子効果が発現する系ではトンネル障壁の形状がトンネリングの前後で変化するので、通常のトンネリングの問題とはやや事情が異なる。そこで、この障壁形状の変化を考慮に入れつつトンネリングレートを簡便に計算する方法を考察した。その結果、単一電子帯電効果がトンネル障壁に及ぼす影響が明らかになり、理想的に電圧バイアスされた微小トンネル接合では、(平行平板キャパシタ近似が成り立つ条件においても)トンネル電流が接合面積に比例しないことがわかった。アイランドが含まれる回路に含

まれるトンネル接合では、この効果は現れない。また、この特異な電流のスケールリングを検証するための化合物半導体を用いた実験を考案し、計算によってトンネル電流の変化のしかたを見積もった。

単一電子回路の代表的なシミュレーションの方法としては、モンテカルロ法とマスター方程式法とがある。両者にはそれぞれに長所短所があり、相互に補完する関係にある。この両者をいずれも扱える汎用の単一電子回路シミュレータを開発した。また、計算量を減らすための手法についても検討した。通常、マスター方程式を解く場合には、どの状態を考慮すればいいかがわからないため、非常に大きなメモリー量と計算時間とが要求される。これを緩和するため、モンテカルロ法とマスター方程式法とを組み合わせさせて定常解析をおこなう方法を提案した。まずモンテカルロ法とそれに続く状態探索により考慮すべき状態を見つける。その上で定常状態のマスター方程式を解く。これによってメモリーを無駄にせず速く正確な計算が可能になった。ほかにも、既存のシミュレータにはない点として、消費電力の計算ができるなどの特色がある。

上記の回路シミュレータは汎用シミュレータではあるが、現実的には大きな回路を扱うには無理があり、よりハイレベルなシミュレーション手法が必要である。また、別の問題として、単一電子デバイスと既存の電子デバイスとを併用したハイブリッド回路の研究も重要視されてきているという現状がある。そこで、業界標準の電子回路シミュレータ SPICE を利用して単一電子トランジスタの含まれる回路をシミュレーションすることを提案した。この方式でシミュレートできる単一電子回路の種類には制限があるものの、シミュレーション速度は劇的に向上し、扱える回路の規模も大きくなった。単一電子トランジスタと MOSFET との混載回路のシミュレーションもできるようになったため、両者の特質を生かした回路を探究していく上で有効なツールとなると思われる。また、単一電子メモリーデバイスのモデルとして、モンテカルロ法とマスター方程式とを組み合わせたモデルを提案した。