

## 電子波伝搬のための分布定数回路モデルに関する研究

## 学位論文内容の要旨

21世紀初頭には、半導体素子の微細化によって低消費電力化、高速化を達成するという従来のアプローチは限界に達すると指摘されていることから、半導体素子の動作原理に量子力学的性質を利用する、すなわちポテンシャル構造を設計して電子や正孔の波動としての性質を制御し、所望の電気的、光学的性質を実現するという、量子効果現象を利用した次世代の電子デバイスの研究が近年盛んになっている。

半導体中の電子や正孔の波動性を利用した量子効果デバイスの可能性を最大限に引き出すためには、ポテンシャル障壁や量子井戸のポテンシャルエネルギーの大きさ、層幅、有効質量等の構造パラメータと波動現象の関係を体系的に把握し、望んだ現象を作り出すためのポテンシャル構造の解析、設計論が必要とされる。量子効果のデバイスへの応用を考える場合、厳密には物性論的、材料科学的な多くの考慮が不可欠であるが、所望の量子効果現象を実現する理想的な構造パラメータを得ることはデバイス実現の際の指針となり得るものであり、重要であると考えられる。

ポテンシャル構造の解析、設計手法には電子や正孔の波動関数や、共鳴トンネル準位、固有エネルギー準位等を工学的に見通し良く、体系的に把握できることが望まれる。そのための1つのアプローチとして、ポテンシャル構造における波動の諸問題に対して分布定数回路理論を主体とした回路理論の概念を利用する試みが行われている。回路理論や分布定数回路理論が熱伝導や音響問題等、多方面の物理系を記述するために利用されていることは良く知られているが、これらの研究は、ポテンシャル構造における波動の諸問題に対しても回路解析、合成の手法を用いた工学的に見通しの良い手法の確立を目的としている。

ところで、これまでの等価回路表現では、考察の対象は有効質量近似 Schrödinger 方程式で記述できる GaAs 系の材料であり、かつ定常状態の研究がほとんどである。共鳴トンネル構造や量子井戸構造等の構成に関しては、GaAs 系の材料のみならず、InAs, GaSb, AlSb 等が研究されており、これらの材料系でつくられるポテンシャル構造中の波動に対して回路理論の概念を導入するためには、従来提案されている回路表現よりも適用範囲が広く、種々の局面に対応できる等価回路が必要である。さらに、量子効果デバイス的高速動作性や微視的な動作機構を明らかにするためには量子力学的な波動の時間発展を捉えることも重要である。これらのことから本論文では、電子波伝搬の解析、合成への回路理論の適用範囲を広げるための新しい回路表現の導出と、共鳴トンネル現象や量子サイズ効果の解析および合成法について述べている。また量子力学的波動の時間発展に対して、分布定数回路のデジタル表現であるウェーブデジタルフィルタ(WDF)を用いることを提案し、それが量子力学的波動の時間発展の解析

手法として有用であることを示している。

本論文は、7章で構成されている。以下に、各章の内容の概略を述べる。

第1章では、緒論として本研究の背景及び目的、従来の関連する研究の概要、本論文の概要を述べた。

第2章では、有効質量近似 Schrödinger 方程式に基づいた複素等価回路について説明した。既に提案されている伝導帯に対する回路表現に加えて、価電子帯を表現する回路表現を導き、定式化を行うとともに、ヘテロ界面での境界条件の回路表現を提案した。種々の半導体材料のヘテロ界面での波動関数の接続をあらわす界面行列が無損失2ポートで、また、 $\Gamma-X$  mixingを伴う波動関数の境界条件が、無損失4ポートで表されることを示し、これまで回路理論に従う取り扱いができなかった界面行列を必要とする GaAs 系以外の多層構造、及び GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  における伝導帯の極小点間の mixing を考慮する必要がある場合について、電子や正孔の挙動を回路的に取り扱うことが可能になり、特別な境界条件を用いることなしに、等価回路の回路関数や回路行列を用いて統一的に解析できることを示した。

第3章では、量子井戸構造および周期的ポテンシャル構造の回路的取り扱いについて述べた。特に、第2章で導出した界面行列の等価回路を用いて、GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  構造、InAs/GaSb 構造について検討した。量子井戸構造では、固有エネルギー準位、複素固有エネルギー準位がそれぞれ回路理論の実周波数、複素周波数に対応づけて定式化できることを述べた。また、周期的ポテンシャルによって生じるミニバンド構造を考える場合、回路理論における反復パラメータが有用であることを述べ、解析を行った。

第4章では、 $\delta$ 形ポテンシャルを用いた透過特性の合成について考察した。 $\delta$ 形ポテンシャルの等価回路が並列の虚数抵抗で表されることを示し、その回路的役割を検討するとともに、共鳴特性に与える影響を明らかにした。さらに、均一なポテンシャル中に $\delta$ 形ポテンシャルを配置した電子波フィルタ構造を提案した。従来の1/4波長の長さの層を多層に組み合わせる手法と比較して、単純な構造および設計手順で同様の透過特性が得られることを示した。

第5章では、2バンドおよび3バンド方程式で記述されるポテンシャル構造の複素等価回路を提案した。確率密度流と有効電力の関係を明確に定義し、Resonant Interband Tunneling(RIT) 構造中の波動現象を回路上の波動現象として定式化できる事を示した。RIT 構造による共鳴トンネル現象について解析し、回路関数や回路行列、中でもインピーダンスの概念が有効に利用できることを述べた。いくつかのポテンシャル構造の透過特性、波動関数、traversal time について検討し、その特徴を明らかにした。

第6章では、波動関数の時間発展の解析のためのウェーブデジタルフィルタモデル(WDFモデル)を提案した。2バンドモデルの等価回路表現に基づき、微小区間のデジタルフィルタ表現を導出し、その縦続接続によって多重バリア構造をデジタルフィルタ表現した。導出されるWDFモデルは参照回路の無損失性を受け継ぐことから数値的に安定であり、さらに周波数依存を持つ境界条件を実現できることを示した。提案したWDFモデルを用いて、これまでほとんど考察されていないRIT構造の時間域シミュレーションを行った。RIT構造に波束を入射してその振舞いを調べることにより、共鳴準位によって生じる準安定状態の崩壊の様子を求めた。また、共鳴トンネル構造に連続的に電子波を入射することにより、共鳴準位の形成過程について解析し、その特徴を明らかにした。

第7章は、本論文の結論として各章の内容に関してあらためて概観するとともに、今後の課題について述べた。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 永井信夫  
副査 教授 小川吉彦  
副査 教授 小柴正則  
副査 教授 末宗幾夫  
副査 助教授 鈴木正清

## 学位論文題名

### 電子波伝搬のための分布定数回路モデルに関する研究

半導体加工技術の進歩により、半導体集積回路（IC）の集積度はサブミクロンの時代に突入し、21世紀の初頭には数十ナノメートルの領域にまで達することが予想されている。素子のサイズがさらに微細化していけば、電子を集団として統計的に扱うことが困難になり、従来のような電流が流れているという描像が必ずしも成立せず、電子の波が伝わるとして取り扱う必要が生じてくる。このような半導体微細構造中の電子の波動性を利用した電子波デバイスは、次世代の電子デバイスとして期待されている。

半導体微細構造中の量子力学的な波動現象について、その解析・設計に便利なだけでなく、現象の理解を容易にする具体的モデルとして等価回路に基づいた回路理論的アプローチが試みられている。しかし、これまでの等価回路モデルは有効質量近似シュレディンガー方程式に基づき、主としてGaAs系の材料によって構成されるポテンシャル構造中の波動現象を表現するにとどまっている。

本論文は、このような現状を考慮し、種々の材料系や局面に対応し得る等価回路モデルに関して研究したもので、7章から構成されている。

第1章では、本研究の背景、目的、および本論文の概要を述べている。

第2章では、従来の有効質量近似シュレディンガー方程式に基づく回路表現においては、ヘテロ界面での境界条件として、波動関数の連続性、及びその1階微分を有効質量で割った値の連続性のみを取り扱っていることに着目し、より柔軟に境界条件を表現し得る回路モデルを提案している。この等価回路モデルによれば、価電子帯および伝導帯を統一的に取り扱うことができることを述べ、より一般的な境界条件は回路理論における理論上の素子である虚数抵抗の組み合わせによって実現されることを示している。これにより、ヘテロ界面で伝導帯、価電子帯に相関のある場合や、 $\Gamma$ -Xミキシング等の多谷効果を取り扱うことが可能となることを述べている。

第3章では、量子井戸構造および周期的ポテンシャル構造の回路的取り扱いについて述べている。従来、GaAs系の量子井戸構造や周期的ポテンシャルには回路理論における共振条件や影像パラメータ、反復パラメータが適用され、古典的回路理論が応用できることが

知られていた。本章では、GaAs系以外の構造に関しても、本論文第2章で提案した回路表現を用いることによって、それらの手法が適用可能であることを示し、解析結果を示している。

第4章では、 $\delta$ 形ポテンシャルを含む1次元ポテンシャル中の電子波の振舞いについて、分布定数回路との類似性を利用して解析を行うとともに、それを利用した透過特性の合成を行っている。まず $\delta$ 形ポテンシャルの等価回路が並列の虚数抵抗であらわされることを述べている。つづいて、ポテンシャルバリアに $\delta$ 形ポテンシャルを含む構造について検討し、 $\delta$ 形ポテンシャルが整合回路の働きをすることにより、完全透過が生じることを示している。さらに、 $\delta$ 形ポテンシャルを用いた電子波フィルタ構造について検討し、従来の $1/4$ 波長の層を多層に重ねた半導体多層膜構造と比較し、単純な構造で同様の特性を実現し得る新たな電子波フィルタ構造を提案している。

第5章では、近年注目されているGaSb、InAs、AlSb等を用いたRIT (Resonant Interband Tunneling) 構造での波動現象を記述できるKaneの2バンド及び3バンドモデルを回路的に考察し、分布定数回路モデルを導出している。導出した回路モデルを用いて、RIT構造における共鳴トンネル現象を解析している。これらの回路モデルに基づけば、伝導帯と価電子帯を同時に考慮することができ、また有効質量のエネルギー依存性も取り入れることができることから、電子波伝搬問題に対する回路理論の適用範囲が大きく拡大されたといえる。

第6章では、波動関数の時間発展をシミュレートするためのデジタルフィルタモデルを提案している。提案されたデジタルフィルタモデルは、2バンドモデルの等価回路から導出され、等価回路の無損失性を引き継ぐことから、数値的に安定なモデルとなっている。提案されたデジタルフィルタモデルを用いて、これまでに示されていない様々なRIT構造中の波動関数の時間発展を求めている。また、GaAs/AlGaAsによる3重及び4重バリア構造に連続的に入射するエネルギー $E$ の電子波の振舞いを解析することにより、電子波の位相コヒーレンス長と共鳴状態の形成過程および透過特性の関係について、明らかにしている。

第7章では、本論文の結論として各章の内容を概観するとともに、今後の課題について述べている。

これを要するに、著者は、量子力学的波動方程式で記述される半導体微細構造中の波動現象の解析・設計理論の基礎となる分布定数回路モデルを提案し、それによって、量子力学的波動現象の回路理論による考察を可能とした。さらに、提案したモデルに基づき、従来の回路モデルでは考察できなかった種々のポテンシャル構造中の波動関数の振る舞いを明らかにするとともに、電子波フィルタ構造、波動関数の時間域解析等に関して有益な新知見を得ており、電子工学の進歩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あるものと認める。