

学位論文題名

複素等価回路による共鳴トンネル効果の
定式化に関する研究

学位論文内容の要旨

集積回路の性能の向上は高集積化・微細化の追求によって成し遂げられてきたが、その物理的・経済的限界から既存の素子設計は21世紀初頭には成り立たなくなると予想されている。従って、従来性能を上回る新デバイスの開発とその設計理論の必要性が高まっている。次世代の新デバイスとして期待されているものの一つに量子効果デバイスが挙げられる。半導体超格子の研究開発によって共鳴トンネル効果などの量子効果が人工的に合成可能となった。量子効果デバイスの性能は従来素子を上回るものと期待されており、近年活発に開発されている。しかし、その設計理論はいまだ確立されておらず、実用化に向けてあらゆる状況に対応できる量子効果の合成理論の確立が急務である。

共鳴トンネル効果などの量子力学的現象を回路理論の範疇で考察する試みは古くから行なわれている。当時の研究は、量子論的諸量を分布定数回路上の測定可能な物理量に置き換えて、わかりやすく見通しのよい議論を実現することが目的であり、完成度が高い回路網理論が注目されたと考えられる。分布定数回路を示す電信方程式と一次元 Schrödinger 方程式が類似した形式であることが一つの理由であろう。

近年、量子効果デバイスの設計法の必要性から、再び量子論に対する回路論的アプローチに関する研究が幾つか報告されている。これらの提案の目的は、豊富で完成度の高い回路網合成理論を基盤にしてデバイス設計法の基礎を確立することである。報告の中では、超格子構造が受動回路として定式化できること、共鳴トンネル効果とサブバンドがそれぞれ影像インピーダンスおよび反復パラメータを用いて考察できることなどが考察されており、量子効果デバイスの設計法の基礎として回路網合成理論の応用が可能であることを示すものである。

これまでに提案されている手法はいずれも伝送線路との等価性を示しているが、しかし幾つかの問題点がある。各手法に共通する問題点は周波数の定義である。量子論の角周波数は Einstein-de Broglie の関係式から、 $\omega = E/\hbar$ (E は電子エネルギー、 \hbar は Planck 定数) である。しかし、従来の手法は明確な定義がされてなかったり、あるいは電子エネルギーの平方根で定義されている。これは、従来の回路素子 (R, L, C など) との対応関係を意識したためと思われる。周波数の定義が異なれば周波数特性の算出、特に過渡現象の考察が困難になると考えられる。

本論文では、従来の問題点を考慮して、量子効果デバイスの解析・設計法の基礎となりうる‘複素等価回路’を提案し、その有効性・妥当性を検討する。取り扱う問題の範囲は、GaAs 系化合物半導体を対象とし、有効質量近似一次元 Schrödinger 方程式で記述可能なものとする。

第2章では、階段ポテンシャルにおける電子波の反射・透過、トンネル効果などを考察し、複素等価回路を導出する。波動関数の振幅を電圧波として定義し、一次定数に理論的な虚数抵抗を導入することにより周波数を量子論と同一に定義できることを示す。確率保存則を有効電力と対応付け、共鳴トンネル効果をインピーダンス整合問題として定式化する。

第3章では、2重バリア、対称3重バリアの共鳴トンネル効果を考察し複素等価回路の妥当性を検討する。はじめに、対称2重バリアの共鳴状態について考察し、従来の報告と比較する。次に、非対称2重バリアで生じる複雑な不完全共鳴のメカニズムがスミスチャートを用いる考察によって容易に理解できることを示す。また、電力反射係数を用いる考察によって相反関係(電子波透過確率が電子の入射方向に依存しないこと)を回路論的に証明する。次に、対称3重バリアの中央バリア幅で定まる不完全共鳴のメカニズムをスミスチャートを利用して考察する。すなわち、対称回路の整合条件は中央より見込んだインピーダンスが実になることである。対称3重バリアは非対称2重バリアの背中合わせの接続と考えることができる。スミスチャート上にインピーダンスを描くと非対称2重バリアの厚いバリア側から見込んだインピーダンスは実にならないことが示され、中央のバリア幅が左右のバリア幅の和より厚くなると完全共鳴が生じないことが証明された。

第4章では、スミスチャートを用いる共鳴準位合成法を提案する。応用例として、対称4重バリアを用いて二つの共鳴準位を合成する手法を示す。また、非対称2重バリアを同一方向あるいは背中合わせに接続した4重バリアの共鳴状態について考察を加えた。

第5章では、量子論的過渡現象である共鳴状態の存在寿命の定式化を行なう。テブナンの定理から左右を見込んだアドミタンスの和の零点を与える複素周波数の実部が寿命に関係することを示す。量子論的過渡現象の考察に回路論的手法が適応できることをはじめて示した。複素等価回路は周波数を量子論と同一に定義しているため、複素周波数変数を用いるシステム関数の考察が回路上で直接実行できる。

第6章では、不純物、ヘテロ界面の凹凸などの不確定要因による電子波散乱の定式化を行ない、共鳴トンネル効果に対する影響を考察する。すでに提案されている経路積分法を応用し、量子井戸での電子波の多重反射を有限回で打ち切ることで散乱のイメージを定式化した。数値計算で、散乱によるピーク形状のくずれを確認した。また、バイアス印加状態では無散乱の値で正規化することによって散乱に対するバイアスの影響を同一視できることがわかった。

第7章では、散乱の影響の別な定式化として、散乱による電子波の振幅の減衰を考慮した複素等価回路を定義した。すなわち、一次定数に漏れコンダクタンスを挿入して井戸層の伝搬定数に減衰項を実現した。数値計算を行ない2重および3重バリアのピーク形状のくずれ、共鳴状態の寿命などに対する散乱の影響を考察した。なお、第6章および第7章での「散乱」はヘテロ界面での反射とは区別している。

最後に、第8章で、本論文を総括し、本研究の成果について要約し、この研究分野の現状、今後に残された課題について述べる。

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 三木 信弘

学位論文題名

複素等価回路による共鳴トンネル効果の 定式化に関する研究

集積回路の微細化・高集積化の追求は、物理的・経済的限界のために21世紀初頭には頭打ちになると予想されている。従って、従来性能を上回る新デバイスの開発とその設計理論の確立が急務となっている。近年、新デバイスとして期待されている量子効果デバイスの解析・設計法を回路理論から考察する試みがいくなされてきている。これらの提案は、回路網合成理論を基礎にして、量子効果デバイスの設計理論を確立することである。しかし、従来の手法にはいくつかの問題点がある。

本論文では、従来の問題点を改善した「複素等価回路」を提案し、量子効果デバイスの解析・設計法の基礎としての回路理論の有効性を検討したものである。その主要な研究成果は、次の点に要約される。

- (1) 従来の手法では不正確であった等価回路の周波数の定義を量子論と同一にした。これは虚数抵抗なる理論的な素子の導入により可能となった。更に、量子論的諸量と回路素子との対応づけを明確にし、共鳴トンネル効果をインピーダンス整合問題として定式化した。
- (2) 共鳴トンネル効果の解析にスミスチャートを応用し、スミスチャート上でインピーダンス特性を考察することにより、複雑な不完全共鳴トンネル現象のメカニズムが容易に理解できることを示した。更に、所望の共鳴トンネル準位をスミスチャートを用いて合成できることを示し、応用例として二つの共鳴トンネル準位を同時に合成する方法を提案した。
- (3) 量子論的過渡現象である共鳴状態の存在寿命の解析法を回路論的に定式化した。周波数の定義を量子論と同一に行なっているため過渡現象の考察が等価回路上で容易に実行できる。数値計算により提案した解析法の妥当性を確認した。更に、従来の解釈とは異なる解析結果、すなわち共鳴準位の半値幅に依存しない寿命が存在することを示した。
- (4) 共鳴トンネルダイオードでは、共鳴準位のピーク値の低下や半値幅の拡大などが問題となっているが、これは不純物、ヘテロ界面の凹凸などの原因により生じると考えられている。この問題を説明できる簡易な回路論的手法を示した。数値解析により対称3重バリヤの考察を行ない、二つの共鳴準位が一つになること、その一つになった共鳴準位に二つの寿命が存在することを示した。

これを要するに、著者は、共鳴トンネル効果などの量子効果が生じる量子微細構造の解析・設計に回路理論を適用し、共鳴トンネル準位の合成や、存在寿命の解析などに関して有

益な新知見を得ており、電子工学の進歩に寄与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。