

学位論文題名

回路理論の応用による多重バリヤ構造の
共鳴トンネル準位の合成に関する研究

学位論文内容の要旨

半導体を用いる諸デバイスが各分野で実用に供され始めてから今日に至るまで急激な発展を遂げてきた。集積回路の高集積化・微細化の追求によって進歩は著しく、まったく目を見張るものであるが、その物理的・経済的限界から既存の素子設計法は 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、従来の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。すなわち、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。

半導体超格子の提案により、超格子構造や多重バリヤ構造の設計や、それらの量子論的な物理特性に関する考察が数多くなされている。また、近年共鳴トンネル効果などの量子現象に対する回路論的アプローチに関する研究がいくつか報告されている。これらの提案は量子現象を回路理論の範疇で考察することによって、より見通しの良い議論を可能にすること、更には体系的によく整理されている回路の合成理論をデバイス設計に応用する可能性を示すものであり、完成度が高く豊富な回路の合成理論を応用して量子効果デバイスの設計論の基盤を確立するものである。

回路論的手法ではない有限要素法や Airy 特殊関数を用いる方法では、ある固定のポテンシャル構造における透過特性の解析は極めて有効であるが、逆に、所望の透過特性を得るために、ポテンシャル構造をどのように組み立てれば良いかという合成問題の解決には困難である。このような問題に対しては回路理論の合成法が有用である。なぜなら、多重バリヤ構造の設計は、その等価回路をいくつかの簡単な区間に分割し、個々の特性を把握した上で行なうほうが容易である。すなわち、各区間の特性が理解できれば、それらをいかに結合させるかという問題に帰着することができる。また、等価回路の表現を用いると、共鳴トンネル効果における電子波透過率を有効電力として取り扱えるので、回路理論において基本的な概念であるインピーダンス、反射係数等を有効に利用した議論が可能である。

本論文は、このような問題を考慮して、複素等価回路を利用して 21 世紀の新デバイスとして期待されている超格子や多重バリヤ構造の素子の動作原理として重要な電子波の伝搬について考察し、要求される波動現象を生み出すポテンシャル構造の設計への指針を与えようとするものである。

第 2 章では、まず、本論文に用いる複素等価回路について簡単に説明する。また、共鳴トンネル現象では透過確率が 1 となる構造が重要なので、その準位を完全共鳴準位とよび所

望の完全共鳴準位の合成を回路的に取り扱い、複素等価回路の透過確率は入力電力に対する負荷で消費される有効電力の比で与えるなら所望の値が得られることを示す。また、等価回路モデルを用いて、簡単な多重バリヤ構造の透過特性について考察している。

第3章の目的は、対称2重バリヤに生じる第2番目の完全共鳴準位を非対称3重バリヤを用いて消すことである。このため、非対称3重バリヤの透過特性、共鳴条件を検討する。完全共鳴条件はインピータンスの整合条件で表されることを示し、単一バリヤ、量子井戸、非対称2重バリヤの縦続接続で一つの完全共鳴準位をもつ非対称3重バリヤを得ている。しかし、透過確率が0.3程度の準位も生じていることがわかった。

第4章では、第3章での結果をふまえて、量子井戸内に唯一の所望の共鳴準位を実現する非対称3重バリヤ構造の合成法を提案する。非対称3重バリヤを第3章と同様に3つの領域に分割して取り扱っており、2重バリヤ部分は3章と違って、対称2重バリヤを用いる。このような非対称3重バリヤによって不必要な共鳴準位のピーク値を低下させるためには、所望の完全共鳴トンネル準位を E_0 とすると、対称2重バリヤの一番目の完全共鳴準位 E_r とは約 $E_r=4E_0$ のような関係があることが最も適切であることがわかり、その理由をスミスチャートを用い考察している。その結果、所望の唯一の完全共鳴準位 E_0 以外の不要な共鳴の電子波透過確率を0.1程度に抑止できることが確かめられた。これは電圧-電流特性の向上に有効であると思われる。

第5章では、実際の電圧印加状態で所望の完全共鳴準位を生じる非対称2重バリヤ構造を提案している。電圧印加の影響で、斜めに傾いているポテンシャルをフラットなポテンシャルで近似する簡易モデルを導入することによって、実際に、電圧印加状態で第一番目のエネルギー準位が完全共鳴準位となるような非対称2重バリヤ構造を合成している。

第6章では、深いポテンシャル井戸を持つ非対称2重バリヤの有する特性を利用して、電圧印加時に所望の透過確率を持つバリヤ構造の合成について検討した。提案した方法によれば、電圧印加時において、所望の共鳴準位が完全共鳴準位となり、完全共鳴準位での透過確率の半値幅を大きくできる。

第7章は、一つの素子で二つの所望の完全共鳴準位を生じる対称4重バリヤ構造と非対称4重バリヤ構造の合成に関して検討した。これは、二つの完全共鳴準位をお互いに独立なものとして、準位あるいはピーク面積を設定できるため、将来二つの完全共鳴準位のスイッチとしても用いられると考えられるものである。本文では、その合成例を三つ求め、単峰や双峰特性を持つというそれぞれ特色のある特性が得られている。

最後に、第8章では、本研究を総括している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	永井	信夫
副査	教授	伊藤	精彦
副査	教授	小柴	正則
副査	教授	末宗	幾夫
副査	助教授	中村	美浩

学位論文題名

回路理論の応用による多重バリヤ構造の 共鳴トンネル準位の合成に関する研究

集積回路の微細化・高集積化の進歩は著しく、物理的・経済的限界のために既存の素子設計法は 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つかなされている。

従来よく知られた有限要素法や Airy 特殊関数を用いる方法では、ある固定のポテンシャル構造における透過特性の解析には極めて有効であるが、逆に、所望の透過特性を得るために、ポテンシャル構造をどのように組み立てれば良いかという合成問題の解決には困難である。このような問題に対しては回路理論の合成法が有用である。多重バリヤ構造の設計は、その等価回路をいくつかの簡単な区間に分割し、個々の特性を把握した上でそれらをいかに結合させるかという問題に帰着することができる。また、等価回路の表現を用いると、共鳴トンネル効果における電子波透過率を有効電力として取り扱えるので、回路理論において基本的な概念であるインピーダンス、反射係数等を有効に利用した議論が可能である。

本論文は、共鳴トンネルダイオードなどの 21 世紀の新デバイスとして期待されている超格子や多重バリヤ構造の素子の動作原理として重要な電子波の透過特性について複素等価回路を利用して考察し、要求される透過特性を生み出すポテンシャル構造の設計法を示したものであり、その主要な成果をまとめると次のようになる。

1. 唯一つの完全共鳴準位を実現できる非対称 3 重バリヤ構造の合成法を提案している。提案した手法によれば、唯一つの完全共鳴準位 E_1 以外の不要な共鳴準位での電子波透過確率を 0.1 程度に抑止できることが確かめられている。
2. 実際の電圧印加状態で所望の完全共鳴準位が生じる 2 重バリヤ構造の合成法が示

されている。そのとき、右側のバリアを左側のバリアより高くかつ薄くすれば、2番目の共鳴準位のピーク値が低く、かつ第一番目の共鳴準位との間隔が広くなることが示されている。

3. 深いポテンシャル井戸を持つ2重バリア構造において、電圧が印加された状態で完全共鳴準位を生じる構造の合成法が示されている。この場合、完全共鳴準位以外のエネルギーにおける透過確率をほとんど零にできることが示されている。

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設計に回路理論を適用し、共鳴トンネル準位の合成や、共鳴トンネルダイオードの共鳴トンネル電流を支配する最も重要な因子である透過確率のピーク値とピーク面積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が大きい。

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。