



量子サイズ構造半導体デバイスの量子輸送に関する研究

土屋, 英昭

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1993-03-31

(Date of Publication)

2007-08-29

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲1182

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3070628>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1001182>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・(本籍)	つちやひであき 土屋英昭	(愛媛県)
博士の専攻分野の名称	博士(工学)	
学位記番号	博い第49号	
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当	
学位授与の日付	平成5年3月31日	
学位論文題目	量子サイズ構造半導体デバイスの量子輸送に関する研究	
審査委員	主査 教授 三好 旦 六	
	教授 峯 本 工	教授 西野 種 夫

論 文 内 容 の 要 旨

分子線エピタキシー法 (MBE) や有機金属気相成長法 (MOCVD) などに代表される結晶成長技術の急速な進展によって、現在では、原子層レベルで半導体結晶成長を制御することができる作製技術が立ち上がりつつある。これに伴って、電子デバイスや光デバイスの中に量子サイズ構造を構成して、デバイスの特性改善や新機能性の実現を計ろうとする試みが、活発に行われるようになった。本研究では、このような量子サイズ構造を有する半導体デバイスの設計技術を確立することを目的として、量子力学的分布関数であるウィグナー関数を用いた量子輸送モデルの定式化とその応用について研究を行った。本論文の構成は、以下の通りである。

第一章では、量子井戸構造を有する半導体デバイスを解析する立場から、エネルギー固有値をもつ系、エネルギー共鳴状態をもつ系および量子輸送を利用する系の三つの系に分類し、それぞれの系を代表するデバイスを例に挙げながら、その特徴について述べた。その三つに分類された系のうち、量子井戸レーザや超格子アバランシェ・フォトダイオード等、将来の高速光通信や並列光コンピューティングシステムを実現するためのキーデバイスとして期待されるものが多く含まれている量子輸送を利用する系に注目し、この系に属する半導体デバイスを解析するために用いられる量子力学的シミュレーションモデルの特徴と概要について述べた。

第二章では、量子構造半導体デバイスの量子輸送モデルについて議論するための準備として、一般的な量子輸送モデルとして知られているウィグナー関数モデルについて、従来の議論をまとめた。 $k \cdot P$ 摂動論に基づいて有効質量方程式を導出することから出発し、ウィグナー関数に関する運動方程式の定式化とその特徴について、古典論との対応を行いながら議論した。また、ウィグナー関数モデル

とは別の手法として良く知られている電子波の透過確率を用いた解析法についても述べた。

第三章では、ウィグナー関数モデルを現実のデバイスモデルに近づけるために、新たに、電子の有効質量の位置変化と電子-電子相互作用を取り入れた新しいウィグナー関数モデルの定式化を行い、半導体量子構造デバイス特有の量子輸送モデルとして提案を行った。この新しいウィグナー関数モデルを、典型的な量子井戸構造電子デバイスである共鳴トンネルダイオードの静特性シミュレーションに適用し、位置変化する有効質量や電子-電子相互作用が輸送特性に与える影響について検討を行った。その結果、これら二つの効果は、共鳴トンネルダイオードの静特性においても重要な役割を果たすことが明らかとなり、高精度なデバイスシミュレーションを行うには、これらの効果を正確に取り入れた量子輸送モデルを用いる必要があることを指摘した。また、本章の後半では、ウィグナー関数モデルを用いて共鳴トンネルダイオードのスイッチング特性や高周波応答特性を検討し、共鳴トンネルダイオードを構成する半導体材料として、電子の有効質量が軽い材料系を用いることにより、スイッチング時間の短縮や発振周波数の向上等を実現できることを示した。さらに、本章の最後では、ウィグナー関数モデルと透過確率法で計算した電流・電圧特性の比較を行い、両モデルの結果には大きな差が生じることを示した。ウィグナー関数モデルで考慮されている量子力学特有のポテンシャルの非局所性はその原因であり、静特性の解析においてさえもウィグナー関数モデルが透過確率法より優れていることを指摘した。

第四章では、量子井戸構造を有する光デバイスのキャリア量子輸送特性を、ウィグナー関数モデルを用いて議論した。まず $1.3\mu\text{m}$ および $1.55\mu\text{m}$ の長波長帯光通信用受光素子として注目されている InP/InGaAs アバランシェ・フォトダイオード (APD) の高速応答特性を制限する原因の一つであるヘテロ界面における正孔蓄積の問題を検討した。これまでに、正孔蓄積を低減して APD の高速化を計ることを目的として、ヘテロ接合部に四元層を挿入する方法、グレーティッド・ギャップ層を挿入する方法およびドーピング界面双極子を挿入する方法が提案されているが、本章では、これらの構造を導入した時のヘテロ界面における正孔蓄積を評価し、正孔蓄積量を低減して APD を高速化するための最適なヘテロ構造について提案を行った。さらに、本章の後半では、量子井戸レーザの特性解析に適用できる量子輸送モデルの確立を目指した研究の第一歩として、レーザ発振閾値以下でキャリア再結合を無視した時のウィグナー関数モデルの定式化を行い、単一量子井戸および二重量子井戸構造を有する量子井戸レーザのキャリア輸送特性の解析に適用した。そこでは、量子井戸構造部における電子・正孔密度分布を計算することによって、障壁層へのキャリア漏れや井戸間の不均一キャリア分布を評価できることを示し、モデルの有用性を明らかにした。

第五章では、電子導波路 (量子細線) にウィグナー関数モデルを適用し、線形および非線形輸送領域における電子導波路の量子輸送特性を議論した。まず、電子導波路が動作する極低温で重要となるイオン化不純物散乱を取り入れたウィグナー関数モデルの定式化を行い、線形輸送領域における電子導波路の量子化コンダクタンスに与える散乱効果の影響について検討を行った。その結果、イオン化不純物が導波路層に平行な平面に二次元状に分布している不純物モデルを用いることによって、実験で観測されるコンダクタンスの量子化ステップの乱れを非常に良く説明できることが分かった。次に、

大電圧が加わった時の非線形輸送領域における電子導波路の振舞いについて検討した。まず、コンダクタンスの非線形性を議論するために、極低温 ($T=0\text{K}$) での電子導波路の電流・電圧特性を計算した。その結果、電圧が増加していくに従ってコンダクタンスが理想的な量子化の値から大きくずれていくことが示され、実験で報告されている結果と一致した。さらに、室温 ($T=300\text{K}$) では、導波路幅を変えることにより、電子導波路がトランジスター動作する可能性があることを示し、その応用についても検討を行った。

また、ウィグナー関数モデルと他の解析モデルとの比較も行った。従来から用いられ良く知られているランダウアー公式との比較では、ウィグナー関数モデルのポテンシャルの非局所性により両者に大きな差が生じることを示した。また、電子の移動度を用いた古典的モデルとの比較では、イオン化不純物散乱が非常に強く起こる場合には、ウィグナー関数モデルと古典的モデルが一致することが明らかとなった。本章の最後では、電子導波路の量子輸送モデルの今後の課題として、磁界の効果と空間電荷の効果について述べた。

第六章では、本論文の総括を行った。本研究で得られた成果と、量子輸送モデルを量子サイズ構造半導体デバイスの設計技術として確立するために、今後、解決しなければならない課題について述べた。

論文審査の結果の要旨

分子線エピタキシー法 (MBE) や有機金属気相成長法 (MOCVD) 等に代表される結晶成長技術の急速な進展によって、現在では、原子層レベルで半導体結晶成長を制御することができる作製技術が立ち上がりつつある。これに伴って、電子デバイスや光デバイスの中に量子サイズ構造を構成して、デバイスの特性改善や新機能性の実現を計ろうとする試みが、活発に行われるようになった。本研究では、このような量子構造を有する半導体デバイスの設計技術を確立することを目的として、量子力学的分布関数であるウィグナー関数を用いた量子輸送モデルの定式化とその応用について研究を行っている。本論文の構成は、以下の通りである。

第一章では、量子井戸構造を有する半導体デバイスを解析する立場から、エネルギー固有値をもつ系、エネルギー共鳴状態をもつ系および量子輸送を利用する系の三つの系に分類している。この三つに分類された系のうち、将来の高速光通信や並列光コンピューティングシステムを実現するためのキーデバイスとして期待されるものが多く含まれている量子輸送を利用する系に注目し、この系に属する量子構造半導体デバイスを解析するために用いられる量子輸送モデルについて述べている。

第二章では、一般的な量子輸送モデルとして知られているウィグナー関数モデルについて、従来の議論をまとめている。 $k \cdot p$ 摂動論に基付いた有効質量方程式の導出から出発し、ウィグナー関数に関する運動方程式の定式化とその特徴について、古典論との対応を行いながら議論している。

第三章では、ウィグナー関数モデルを現実の半導体量子構造デバイスに適用するため、電子の有効質量の位置変化や電子-電子相互作用を取り入れた新しいウィグナー関数モデルの定式化を行って

る。この新しいウィグナー関数モデルを典型的な量子構造電子デバイスである共鳴トンネルダイオードの静特性シミュレーションに適用し、位置変化する有効質量や電子-電子相互作用がその輸送特性に与える影響について検討を行っている。その結果、これら二つの効果は、共鳴トンネルダイオードの静特性においても重要な役割りを果たすことが明らかとなり、高精度なデバイスシミュレーションを行うには、これらの効果を正確に取り入れる必要があることを指摘している。また、本章の後半では、ウィグナー関数モデルを用いて、共鳴トンネルダイオードのスイッチング特性や高周波応答特性を計算している。そこでは、共鳴トンネルダイオードを構成する半導体材料として、電子の有効質量が軽い材料系を用いることによって、スイッチング時間の短縮や発振周波数の向上等を実現できることが示されている。

第四章では、量子井戸構造を有する光デバイスの量子輸送特性を議論している。まず $1.3\ \mu\text{m}$ および $1.55\ \mu\text{m}$ の長波長帯光通信用受光素子として注目されている InP/InGaAs アバランシェ・フォトダイオード (APD) の高速応答特性を制限する原因の一つであるヘテロ界面における正孔蓄積の問題を取り上げ、ウィグナー関数モデルを用いて議論している。正孔蓄積を低減して APD の高速化を計ることを目的として従来より提案されている、ヘテロ接合部に四元層を挿入する方法、グレーティッド・ギャップ層を挿入する方法およびドーピング界面双極子を挿入する方法について、その最適なデバイス構造を明らかにしている。さらに、本章の後半では、量子井戸構造半導体レーザの特性解析に適用できる量子輸送モデルの確立を目指した研究の第一歩として、レーザ発振しきい値以下でキャリア再結合を無視した時の単一および二重量子井戸構造におけるキャリア輸送特性について、ウィグナー関数モデルを用いた議論を行っている。

第五章では、電子導波路 (量子細線) の電気伝導解析にウィグナー関数モデルを適用し、その量子輸送特性を議論している。まず、電子導波路が動作する極低温で重要となるイオン化不純物散乱を取り入れたウィグナー関数モデルの定式化を行い、電子導波路の量子化コンダクタンスに与える散乱効果の影響について検討を行っている。さらに、電子導波路に大電圧が加わった時の非線形輸送特性を調べ、室温では、導波路幅を変えることにより、電子導波路がトランジスタ動作する可能性があることを示し、その応用についても検討を行っている。

第六章では、本論文のまとめを行っている。

本研究は、量子構造半導体デバイスの設計技術に関して、量子力学的分布関数であるウィグナー関数を用いた量子輸送モデルの定式化とその応用について研究したものであり、量子サイズの半導体電子デバイス、光デバイスの輸送モデルについて工学上重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者土屋英昭は、博士 (工学) の学位を得る資格があると認める。