

氏名	町 田 悟		
学位の種類	博 士 (工学)		
学位記番号	工博甲第243号		
学位授与の日付	平成18年9月30日		
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	階段状ステップ量子井戸における光生成キャリア垂直伝導物性に関する研究		
論文審査委員	主 査	教 授	藤 原 賢 三
		”	出 口 博 之
		”	近 浦 吉 則
		”	古 曳 重 美

### 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

半導体量子ヘテロ構造におけるキャリアの挙動、とりわけ結晶成長方向に沿った垂直方向へのキャリア垂直伝導は半導体量子デバイス動作に直結した重要な物性現象である。例えば、量子井戸半導体レーザにおいては、活性層へ向かう注入キャリアの伝導メカニズムを明らかにする事は高効率発光及び高速動作実現の為に必要である。このヘテロ構造の利用による垂直伝導制御法は、2000年度のノーベル物理学賞を受賞した H. Kroemer 教授による研究を契機としている。これまでに垂直キャリア伝導性に関する研究は、主としてキャリア捕獲とトンネル効果に基づくキャリア垂直伝導（超格子ブロッホ伝導）機構が研究されてきた。

一方、近年の半導体量子ヘテロ構造の結晶成長技術の進歩により、短周期超格子閉じ込め層の概念やさまざまな量子複合構造を組み合わせた超周期超格子構造などの高度な複合量子井戸構造の作製が可能となり、そのキャリア垂直伝導機構や発光再結合過程、エネルギー緩和過程、キャリア捕獲過程の制御方法が関心を集めるようになった。本研究の目的は、各量子井戸が異なる構造パラメータを持つ階段状のポテンシャル構造を有する全く新しいタイプの複合量子井戸構造において、キャリア垂直伝導物性を解明する事である。本研究では、このための研究方法としてフォトルミネッセンス(PL)法を利用して、さまざまな波長のレーザ光励起により生成したキャリアが、複合量子構造内で発光するルミネッセンス光を検出して、量子構造間の伝導過程を調べる分光学的方法を用いる点に特徴がある。この PL 発光の過渡的時間変化をピコ秒時間領域で検出できるストリークカメラ装置を利用した超高速時間分解 PL 法等を用いて、格子温度を変化させた際の量子垂直伝導現象を明らかにした。また、超高速量子伝導現象の実験データの解析手法として、多変数レート方程式の数値計算法による解析を実施して、複合量子構造内でのキャリアの転送時間を決定した。さらに、新しい垂直伝導現象として、複合量子井戸構造内での非線形光励起過程を利用した、ポテンシャル勾配と逆向きに伝導する特異な垂直伝導過程（up-conversion 過程）を、共鳴光励起を利用したレーザ分光法的手法により研究し、ナノメートル空間における非線形量子伝導現象の存在を検証した。

第1章では、本論文における背景、目的および構成を記述した。第2章では量子井戸及び多重量子井戸構造等の概念を記述し、量子化準位計算の手法を述べるとともに、量子井戸層に用いた InAlGaAs 混晶半導体の性質、物性定数の理論計算を元に試料の物性パラメータ値を算出した。また、本研究の主要課題である半導体量子構造へのキャリア捕獲過程及び発光現象の基本的概念、これまでの研究経緯について説明した。さらに、実験手法としてフォトルミネッセンス分光法及びピコ秒時間分解 PL 測定法、特にストリークカメラの動作原理に関して記述した。第3章では、5つの異なる In 組成を持つ量子井戸層から構成される階段状ステップ複合量子井戸試料について、PL スペクトル結果及び時間分解 PL 測定結果を述べた。PL 発光の励起強度依存性より、観測された5つの明瞭な発光ピークは、複合量子井戸層についての第一量子化準位間励起子による発光である事を同定した。また、PL スペクトルの温度依存性から、格子温度上昇に伴うキャリアのフォノン散乱支援垂直伝導により浅い

ポテンシャルから深いポテンシャル側への方向性移動が可能である事を検証した。この事は、階段状ステップ量子井戸構造では深いポテンシャル方向への擬似的電界が作用している事と等価である事を意味している。時間分解 PL 測定結果及びレート方程式に基づく数値解析シミュレーションにより擬似的電界によるフォノン散乱支援垂直伝導過程を、PL 発光過渡応答特性の解析から明らかにした。更に数値解析シミュレーションから得られたキャリア転送時間の妥当性を検証するために、PL 強度の時間発展から見積もったキャリア転送時間とシミュレーション結果から得たキャリア転送時間との比較評価を実施し、解析の妥当性を確認した。第4章では、階段状ステップ複合量子井戸構造について、出力光エネルギーが入力光エネルギーよりも大きなエネルギーを示す反ストークス発光現象を研究した。PL 発光スペクトルの光励起エネルギー及び励起強度依存性を詳細に研究し、反ストークス発光における光励起キャリアの非線形垂直伝導に関する挙動を明らかにした。波長可変レーザ光源を利用して、光励起エネルギーを GaAs 層に共鳴する値に設定した時、バンド間遷移エネルギーが大きく透明である5つの量子井戸からの発光が確認された。この反ストークス PL スペクトル強度分布と障壁層のみを励起する間接励起時の PL スペクトル強度分布との比較および励起光強度依存性から、GaAs バッファ層での非線形光励起 (up-conversion) による光励起キャリアは障壁層中の伝導と競合的共鳴捕獲により決定されることを示した。さらに、共鳴光励起を利用して特定の量子井戸層を励起したとき、最隣接井戸からの強い反ストークス PL 発光現象を観測し、異なる量子井戸層で観察された反ストークス PL 強度のナノ領域位置依存性を調べることにより、非線形光励起機構とともに量子垂直伝導が重要な役割を演じていることを明らかにした。第5章では、得られた研究結果を総括し、本研究で得られた成果をまとめた。

## 学位論文審査の結果の要旨

半導体量子ヘテロ構造は、半導体レーザ光源や光検出デバイスなどの超高速、大容量の光通信技術、光情報処理技術等に用いられており、光エレクトロニクスにおいて極めて重要な構造要素である。二重ヘテロ接合構造の導入によりキャリア垂直伝導を制御する新概念(2000年度ノーベル物理学賞、Krömer 教授)は半導体レーザの実用化に大きな寄与を果した。このことを契機として、その後の半導体超薄膜結晶成長技術の進展により、量子ヘテロ構造におけるトンネル効果やキャリア捕獲など、半導体量子デバイス動作に直結したキャリア伝導物性の研究が行われている。本論文は、異なる量子井戸構造パラメータを持つ階段状のポテンシャル構造を有する新しい複合量子井戸構造におけるキャリア垂直伝導物性を、主として分光学的実験手法を用いて明らかにした論文として、提出されたものである。

第1章では、本研究の位置づけ、背景、目的、構成を、第2章では、実験に用いた試料の特長、即ち、インジウム(In)組成を高精度に系統的に変化させることにより、InAlGaAs 混晶半導体を量子井戸層とすることでポテンシャル構造を変調させた複合量子井戸構造の特長を説明している。また、実験手法として用いたフォトルミネッセンス (PL) 分光法、ピコ秒時間分解 PL 測定法の構成および原理について述べている。第3章では、5つの異なる In 組成を持つ量子井戸層からのバンド間遷移による発光を測定することにより、階段状複合量子井戸構造では、量子準位が関与した励起子の発光が支配的であり、各量子井戸層のポテンシャル構造が異なることから、様々な波長のレーザ光励起により生成したキャリアが、複合量子構造内で発光するルミネッセンス光を検出して、分光学的に区別して各量子井戸位置におけるキャリア密度を評価できること、即ち、量子井戸間の伝導過程を調べることができることを実証している。また、各量子井戸層の発光強度は試料の格子温度を変化させると著しく変化することから、量子井戸における励起子の占有密度の変化、即ち、電子正孔密度の移動を反映したキャリア垂直伝導現象が起こることを検証している。さらに、これらの PL 発光強度のダイナミクスを、超高速ストリークカメラを用いて測定することによりキャリア垂直伝導性を直接的に時間の関数として捕らえる事に成功し、ポテンシャル勾配により形成される擬似的電界が垂直伝導現象を引き起こすことを実験的に検証すると同時に、レート方程式に基づく数値解析シミュレーションによりキャリア転送時間を求め、フォノン支援垂直伝導過程を定量的に明らかにすることに成功している。第4章では、発光エネルギーが入力励起光エネルギーよりも大きい反ストークス発光現象を研究する

ことにより、複合量子井戸構造についての発光強度は障壁層中の伝導および競合的共鳴捕獲過程により決定されていることを光励起エネルギー依存性と励起光強度依存性の詳細な実験結果から明らかにしている。また、波長可変レーザー光源を用いて特定の量子井戸層を共鳴的に光励起することにより、異なる量子井戸層からの反ストークス発光強度の励起位置依存性を調べ、非線形光励起機構とともに量子垂直伝導過程が重要な役割を演じていることを検証している。第5章では、本研究で得られた結果を総括している。

以上を要するに、本論文は階段状ステップ量子井戸におけるキャリア垂直伝導の基礎的過程を、分光学的手法を用いることにより、その基礎物性を明らかにしており、光エレクトロニクス技術の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認められる。

なお、本論文に関して審査委員及び公聴会における出席者から、（1）擬似的電界とキャリア転送、（2）格子温度とキャリア温度、（3）非線形光励起と非線形伝導、（4）応用上の意義等について質問がなされたが、いずれも著者からの的確な回答がなされ、質問者の理解が得られた。また、当審査委員会は、著者のこれまでの出版原著英文論文、中間発表、公聴会及び国際会議発表論文から判断して、著者は十分に高い英語能力を持つものと認めた。

以上の結果から、当審査委員会は著者が最終試験に合格したものと認める。