

論文審査の結果の要旨

氏名 丸山 俊

半導体中のキャリアのエネルギー分布に関しては、これまで準熱平衡分布に従うものとして、発光スペクトルや利得スペクトルを始めとする多くの光学特性が議論され、その有効性は広く認識されてきた。光励起されたキャリアは必然的に非平衡状態となるが、バンド内緩和の時間スケールが他の時間スケールに比べて十分短い場合には、バンド内のキャリアの分布はほぼ熱平衡状態にあると考えることができる。しかし、その一方で、準熱平衡モデルとはかけ離れた発光スペクトルが観測された実験結果も報告されており、明確な基準に基づくキャリア分布の評価手法が存在しないこともあり、光励起キャリアの準平衡・非平衡に関するコンセンサスは未だ確立していない。本論文では、非ドープ半導体量子井戸において、光励起で生成されたキャリア分布の準平衡・非平衡を定量的に評価することを目的として、発光分光測定を行った結果をまとめたものである。

本論文は日本語で書かれ全5章からなる。まず第1章では、光励起キャリアの分布に関するこれまでの研究報告について、非ドープ量子井戸を対象としたものを中心に紹介し、キャリア分布評価の基準として本研究で用いるKennard-Stepanov (KS) 関係式について述べている。KS関係式は、熱平衡系の発光と吸収の間に一般的に成り立ち、吸収スペクトルと発光スペクトルの比からキャリア温度が得られる関係式となっていることから、この表式の成立の有無が熱平衡の基準になり得ることを述べている。また、4章で述べる共鳴Rayleigh散乱 (RRS) とHeitler 効果に関する説明も行っている。

本論文の主要な結果は、2章から4章までに述べられている。第2章では、本研究で用いた量子井戸試料やその測定方法、基本光学評価の結果などについて述べている。また、均一性の高い試料を得るため、単一の非ドープGaAs/AlAs量子井戸を選び、界面ラフネスを低減するためのデザインなどについて触れるとともに、本研究の中心となる発光と吸収の光学スペクトルを精度良く測定するための暗視野励起配置、直交偏光子、スペクトル形状の不変性を利用したフィッティングによる励起光散乱の除去方法など、本研究で新たに開発した実験手法について述べている。

第3章では、光励起キャリア分布の準平衡・非平衡の評価を行った実験結果について述べている。線形応答領域で測定された発光 (PL) スペクトルと発光励起 (PLE) スペクトルが得られれば、KS関係式を用いて、2つのスペクトルの比の対数であるスペクトル関数が直線性を持つ場合は準平衡と見做すことができ、その傾きからキャリア温度を評価できる。実験により得られたPLEスペクトルでは、27モノレイヤーと26モノレイヤーの井戸幅に相当する1s励起子ピークと、その上に連続状態のステップ構造が見られた。励起子ピークのエネルギーで励起した共鳴励起条件では、スペクトル関数はほぼ全エネルギー領域で直線と

なり、キャリアは全エネルギー領域で準平衡状態にあると結論付けた。これにより、非ドープ量子井戸で全エネルギー領域においてKS関係式が成り立つことを実験的に初めて実証した。また、キャリアの温度は、環境温度より若干高く、環境温度が低いほど環境温度との差は増加するものの、環境温度より少し高い準平衡状態にあると結論付けた。

一方、非共鳴条件で励起した場合のスペクトル関数は、1s励起子と連続状態の2つのエネルギー領域の境界でステップ状の段差を持つことを見出した。そのステップ幅 Δ は、環境温度が低いほど増加するが、2つの領域の内部では関数の直線性は保たれており、かつ2つの領域内の関数の傾きはほぼ一致することから、2つの部分系の間には非平衡分布が実現しているが、それぞれの部分系の中では準平衡分布が保たれていると解釈された。3章の中盤では、3準位モデルに基づく解析を行い、ステップ幅 Δ の大きさを決める因子である励起子再結合レート、励起子イオン化レートを評価し、各準位のエネルギー占有率の平衡分布からのずれが Δ と対応し、 Δ の温度依存性がイオン化レートの温度依存性により説明できる可能性について述べている。3章の後半では、キャリア温度が励起光エネルギーによってどのように変化するかを系統的に調べている。励起光エネルギーが1s励起子の領域にある場合には、励起光エネルギーの上昇とともにキャリア温度が上昇し、連続状態を励起する領域にある場合には、キャリア温度は一定値となる結果を得た。このことは、フォノン系への余剰エネルギーの伝達効率が、励起されるキャリアの状態によることを示唆しており、興味深い結果である。

第4章では、これまでの実験により、PLEスペクトルの形状と強度が強い温度依存性を持つ事実に着目し、その原因を明らかにするため、共鳴Rayleigh散乱(RRS)過程が関与していることを明らかにした実験結果について述べている。共鳴励起条件では、環境温度の低下とともにPLEピーク強度が大幅に減少し、反対に励起子のRRSピークが急激に増加した。30 K以下では、2つのピークは競合しており、低温になるに従い励起子基底状態の分極緩和時間が長くなっていることを示唆する結果を得ている。

第5章では、本論文で得られた知見をまとめ、その意義と展望について述べている。

以上、本論文は、半導体量子井戸における光励起キャリアの準平衡性・非平衡性を評価するための新たな実験方法を提案したものであり、非平衡性の原因に迫る知見を与える研究として意義あるものと認められる。励起条件によって、量子井戸のキャリアの非平衡性が変化することを明らかにしただけではなく、非平衡分布を定量的に特徴づける重要なパラメータを定義し、その原因となる遷移レートなどの新たな知見も得たことは高く評価される。本論文の内容は、論文提出者が主体となって試料の設計、実験系の構成から測定および解析を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断される。よって、審査員全員が学位論文として十分なレベルにあり、博士(理学)の学位を授与できると判断した。