

審査の結果の要旨

氏名 島田 洋 蔵

半導体結晶成長技術の進歩により、高品質な半導体超薄膜ヘテロ構造の作製が可能となってきた。特に、数ナノメートル程度の膜厚の電子閉じ込め層とエネルギー障壁層を有する半導体超格子構造や量子井戸構造中では、電子の波動性に基づく量子閉じ込め効果、トンネル効果など、様々な量子力学的効果が現れ、テラヘルツ光デバイスへの応用が期待されている。本論文は、”Tunneling phenomena and their terahertz dynamics in semiconductor superlattices” (「半導体超格子中のトンネリング現象とそのテラヘルツダイナミクスに関する研究」) と題し、半導体超格子構造や量子井戸構造中におけるキャリアの伝導ダイナミクスやサブバンド間遷移過程に関する物理的な知見を得るとともに、テラヘルツ光デバイスへの応用可能性を議論したものであり、5章より構成されており、英文で記されている。

第1章は序論であり、本論文が対象としている半導体超格子構造や量子井戸構造について、電子のコヒーレントな振動的トンネル効果であるブロッホ振動や、多重量子井戸内のサブバンド間遷移を応用した量子井戸テラヘルツ光検出器や量子カスケードレーザなど、デバイス応用に関するこれまでの研究の背景を簡潔に紹介するとともに、本研究の目的について述べている。また最後に本論文の構成を示して、各章の概略を説明している。

第2章では、エネルギー障壁層が比較的厚く、量子井戸間の結合が弱い超格子構造中で起きるシーケンシャル共鳴トンネル伝導の定量的理解とそのダイナミクスについて議論を行っている。一般に、超格子中のシーケンシャル共鳴トンネル伝導は、周期的な微分負性抵抗や階段状のプラトー電流 - 電圧特性、バイアスのスイープ方向によるヒステリシス等の特徴的な振る舞いを示す。本研究では、シーケンシャル共鳴トンネル効果においては、各量子井戸層でトンネル電子の位相情報が失われるということに着目し、超格子全体を隣接する2つの量子井戸間の2次元 - 2次元トンネル伝導というセグメントに分け、それを直列に接続したものとして、超格子全体の電流 - 電圧特性が理解できるという独自のモデルを提案し、それにより電流 - 電圧特性に現れる微分負性抵抗の有無を、トンネル確率と供給関数のスペクトル形状の兼ね合いにより、定量的に説明することに成功している。また、同モデルを用いて、超格子に強磁場を印加することにより現れるシュタルクサイクロトロン共鳴トンネル電流中の微分負性抵抗の出現・消滅を、ランダウ準位の占有率と準位のブロードニングの関係により説明できることも示している。さらに、超格子にステップ電圧や三角波電圧を印加することにより、高電界ドメイン形成のダイナミクスについて評価し、高電界ドメインの形成には有限な時間が必要で、その時間はトンネル抵抗を介して高電界ドメインの境界を充電する時間に相当することを明らかにしている。

第3章は、エネルギー障壁層が薄く、量子井戸間の結合が強い、広いミニバンドを有する超格子構造中で起きるコヒーレントなトンネル伝導現象(ブロッホ振動)について、そのダイナミクスを明らかにする新しい手法の構築を行うとともに、それを用いてブロッホ振動する電子の伝導率について考察している。1970年、江崎らにより提案された半導体超格子中をブロッホ振動する電子を用いた発振器・増幅器は、その実現可能性に様々な疑問が投げかけられてきた。一般に、超格子中のブロッホ振動の周期はサブピコ秒領域にあり、従来の直流的な手法ではブロッホ振動を観測することはできない。本論文では、超高速に伝導する電荷が放射するテラヘルツ電磁波を、フェムト秒レーザパルスを用いて時間領

域で測定する系（時間分解テラヘルツ分光系）を構築し、超格子中に光励起された電子の伝導ダイナミクスの解析を行っている。電界を印加した超格子試料にフェムト秒レーザパルス照射したところ、プロッホ振動に伴う振動的なテラヘルツ放射を極低温から室温まで明瞭に観測することに成功している。さらに、測定されたテラヘルツ放射の時間波形が、ミニバンド中を伝導する電子の電界に対するステップ応答と等価であることに着目し、テラヘルツ放射のフーリエスペクトルよりプロッホ振動する電子の伝導率スペクトルに関する情報を得、数テラヘルツまでの電磁波に対してプロッホ振動電子が利得を有しているという強い実験的示唆を得ることに、世界で初めて成功している。このことは、プロッホ発振器・増幅器の実現可能性に実験的に初めて支持を与えるものとして重要な成果である。また、放射されるテラヘルツ電磁波波形と強度の電界依存性より、プロッホ利得の最高周波数が、基底ミニバンドから上位ミニバンドへのジーン・トンネル過程により制限されていることも明らかにしている。

第4章では、単一量子井戸中に形成される量子準位間のサブバンド間遷移を用いた高感度テラヘルツ光検出器の可能性について議論している。単一量子井戸にテラヘルツ光を照射し、サブバンド間遷移により電子が励起準位に励起され、量子井戸から脱出すると、量子井戸中の荷電状態が変化し、バンド曲がりが起こる。このバンド曲がり効果を積極的に用いた高感度のテラヘルツ光検出器の実現に向けて、単一量子井戸テラヘルツ光検出器の光電流のダイナミクスを評価するとともに、バンド曲がりトンネル電流に与える影響を理論的に考察している。単一量子井戸（二重障壁）素子構造に自由電子レーザパルス照射し、単一量子井戸テラヘルツ光検出器の光電流波形を測定したところ、低バイアス領域では自由電子レーザのマクロパルスに追従した速い応答の光電流のみが観測されるのに対し、高バイアス領域では速い成分の直後に、自由電子レーザのマクロパルスがターンオフした後も緩やかに減衰する遅い応答の光電流成分があることが見出された。光励起によりキャリアが脱出することによるバンド曲がり効果を取り入れたバンド計算を行い、遅い電流成分が、エミッタ層やコレクタ層から共鳴的に量子井戸内に電子を再充電するプロセスが禁止されるために発生することを明らかにしている。また、この長い時定数の光電流成分は、テラヘルツ光検出器の感度を格段に向上させるために有効であり、従来の量子井戸テラヘルツ光検出器の感度を百倍程度改善する可能性を示している。

第5章は結論であり、本研究で得られた主要な成果をまとめている。

以上のように本論文は、半導体超格子構造や量子井戸構造中の電子の波動性に基づくトンネル効果、サブバンド間遷移効果など、様々な量子力学的効果について、電気伝導測定や時間分解テラヘルツ分光法、自由電子レーザパルスなどを駆使することにより、キャリアのトンネルダイナミクスを明らかにするとともに、テラヘルツ領域におけるプロッホ発振器・増幅器やサブバンド間遷移を利用した高感度テラヘルツ光検出器の実現可能性を示したものであり、電子工学に貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。