

論文内容の要旨

論文題目 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

氏名 島田 洋 蔵

1. 研究の背景

この四半世紀の間、半導体技術は急速な進歩を遂げ、分子線エピタキシー法に代表される結晶成長技術や半導体プロセス技術の向上により、高品質な半導体の微細構造（半導体量子ナノ構造）の作製が可能となってきた。中でも、層ごとに半導体物質が変わるヘテロ構造を多層に積み重ねた超格子構造の提案は、電子の振動現象であるプロッホ振動を利用した新しいテラヘルツ光デバイスの可能性を示唆した。さらにこの物質系は従来予想もされなかった興味ある現象を数多く示し、物質内の電子を所望の層内に閉じ込めておくことのできる新しい物質群を作り出すことを可能にし、新たな半導体デバイスの研究開発分野をも開拓した。この超格子に代表される半導体量子ナノ構造の特徴的な物性値、例えば量子化準位やその準位間エネルギー等は、ちょうどテラヘルツ電磁波のエネルギーに相当する。そのため、半導体量子ナノ構造を用いることによって、その特徴を活かした様々なテラヘルツ光デバイスの可能性が開けてきた。

本研究は半導体超格子構造を用いたテラヘルツ光デバイスの実現を目指し、半導体超格子中のトンネル効果とそのキャリアダイナミクスを明らかにすることを目的としている。本研究では、まず、化合物半導体超格子構造を分子線エピタキシー法により作製し、その電子伝導特性から量子化準位の形成とシーケンシャル共鳴トンネル現象について明らかにした。次に、超格子中の超高速電子伝導現象を調べるため、相関法による時間分解テラヘルツ分光系を構築し、超格子中のミニバンド伝導に伴うテラヘルツ放射を評価した。さらに、単一量子井戸テラヘルツ光検出器を作製し、光励起された量子井戸内電子のトンネリングプロセスの解明を行った。

2. 半導体超格子中のシーケンシャル共鳴トンネリング

ドーピングされた半導体超格子中のサブバンド間遷移やシーケンシャル共鳴トンネリング現象は、量子井戸赤外フォトディテクタや、量子カスケードレーザーなどの新しい光デバイスへの応用可能性のため注目を集めている。一般に、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中の典型的な電子伝導特性は、シーケンシャル共鳴トンネル現象として特徴付けられ、周期的な微分負性抵抗 (NDR) や、階段状のプラトー特性、バイアスのスイープ方向によるヒステリシス等のユニークな伝導現象を示す。本研究では、量子井戸構造中の量子化準位の形成とシーケンシャル共鳴トンネル現象の定量的理解およびそのダイナミクスの解明を目的に、ドーピングした超格子構造中のヘテロ界面と垂直方向の電子伝導特性の評価を行った。

超格子試料は、量子井戸内のキャリア密度の異なる複数の試料を作製し、キャリア密度と伝導現象の相関を詳細に評価した。特に、シーケンシャル共鳴トンネル効果では、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た。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を明らかにした。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が明らかになった。また、ドメイン境界がエミッタ側からコレクタ側に遷移していく過渡現象を明らかにし、低キャリア密度素子のユニークな現象として、DC バイアスに対する高電界ドメイン形成の過渡現象に伴う持続的な電流振動現象の観測にも成功した。

3. 超格子中のテラヘルツゲイン

超格子中のプロッホ振動はフェムト秒領域の超高速現象であり、従来のDC的な観測手法ではこの超格子中の電子伝導現象を観測することができなかった。そのため、超格子中の電子伝導を解明する上で、超高速な電子伝導現象を時間スケールで観測する手段を確立することは非常に重要である。そこで本研究では、半導体中の超高速キャリアダイナミクスを観測するため、相関法による時間分解テラヘルツ分光測定系を構築し、超格子中の電子伝導に伴い放射されるテラヘルツ電磁波を時間分解測定し、超格子中の過渡的な伝導現象の解析を行った。

本研究で開発した時間分解テラヘルツ分光系は、擬似的な自己相関法によるものでフ

フェムト秒パルスレーザーとマイケルソン干渉計から構成され、テラヘルツ電磁波の検出器としてポロメータを用いている。ポロメータはテラヘルツ電磁波のパワーを測定するものでそれ自体には時間分解能は無い。そこで、マイケルソン干渉計により時間遅延を伴う励起レーザーパルス列を生成し、これより生成された二つのテラヘルツ電磁波の相関信号を遅延時間に対してポロメータにより測定している。また、キャリアダイナミクスの測定に適したミニバンド構造の異なる数種類の超半導体格子構造を分子線エピタキシー法により作製した。

まず、フーリエ分光法を用いた光電流スペクトルの評価より超格子中のミニバンドとワーニエ・シュタルク・ラダーの形成が明瞭に観測され、良好な素子構造が形成されていることが確認された。次に、時間分解テラヘルツ分光測定法を用いて超格子中のミニバンド伝導を評価し、ブロッホ振動に伴うテラヘルツ放射を室温において観測することに成功した。この結果より、ブロッホ振動が室温においても励起される比較的口バストな現象であることが分かった。また、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ブ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ブ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た。

また、印加電界の増大に伴って数テラヘルツ程度までブロッホ振動が確認されたが、ある電界以上ではブロッホ振動によるテラヘルツ放射は観測されなくなった。しかし一方で、測定されるテラヘルツ放射強度は電界に従って強くなり、テラヘルツ放射強度の電界依存性に周期的なピーク特性の存在が観測された。このテラヘルツ放射強度の電界依存性に現れた周期特性のフーリエ解析の結果より、高電界下におけるテラヘルツ放射は第1ミニバンドと上位のミニバンドとの相互作用による伝導現象であり、観測されたテラヘルツ放射はミニバンド間ツェナートンネリングによるものであることが明らかになった。

4. サブバンド間テラヘルツ光吸収とフォトカレントダイナミクス

単一量子井戸テラヘルツ光検出器はバンド曲がり効果により高性能なテラヘルツ光検出器として機能することが期待されるとともに、そのシンプルな構造から量子井戸構造中の光吸収メカニズムの解明に有利である。単一量子井戸にテラヘルツ光を照射すると、サブバンド間遷移により電子が励起準位に励起され、量子井戸から脱出し、その結果量子井戸中の荷電状態が変化し、バンド曲がりが起こる。本研究では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解析した。特に、波長可変性とパルス性の特徴を有する自由電子レーザーを励起光源として利用し、量子井戸内の光励起キャリアの過渡的な伝導現象を評価した。自由電子レーザーの発振波長は単一量子井戸テラヘルツ光検出器のピーク吸収波長にチューニング

し、自由電子レーザーパルスに同期した過渡的な光励起電流の時間応答を測定した。その結果、低バイアス領域では、自由電子レーザーのマクロパルスに対応した速い応答の光電流のみが観測されたのに対し、高バイアス領域では速い成分のほか、自由電子レーザー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の存在が明らかになった。この光電流成分の起源を明らかにするため、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示した。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改善する可能性を示している。

5. まとめ

本研究は半導体量子ナノ構造を用いたテラヘルツ光デバイスの実現を目指し、半導体超格子および量子井戸構造中のトンネル効果とそのキャリアダイナミクスを明らかにすることを目的に研究を行った。評価した超格子および量子井戸構造素子は、すべて化合物半導体ヘテロ構造で分子線エピタキシー法により作製した。まず、弱結合超格子中のヘテロ界面と垂直方向の電気伝導評価では、シーケンシャル共鳴トンネル現象と高電界ドメイン形成のダイナミクスについて明らかにした。次に、超格子中の超高速電子伝導現象を調べるため、相関法による時間分解テラヘルツ分光測定系を構築し、超格子中のミニバンド伝導に伴うテラヘルツ放射を評価した。その結果、プロッホ振動によるテラヘルツ放射の観測に成功するとともに、プロッホ電子のテラヘルツ電磁波に対するゲインの存在について、世界で初めて実験的にその可能性を示した。さらに、単一量子井戸テラヘルツ光検出器を作製し、自由電子レーザーを用いたキャリアダイナミクスの評価により光励起された電子のトンネリングプロセスを解明し、バンドベンディング効果による高感度化の解析を行った。