

審査の結果の要旨

氏名 張 亜

テラヘルツ電磁波の光子エネルギーは数～数十 meV の範囲に位置し、様々なナノ構造中の典型的なエネルギースケールと整合するため、テラヘルツ電磁波を用いたナノ構造の物性解明が期待されている。しかし、テラヘルツ電磁波の波長はおおよそ 100 μm であり、ナノ構造との相互作用は極めて小さい。本論文は、”Terahertz spectroscopy of sublevel structures in single self-assembled InAs quantum dots” (「単一自己組織化 InAs 量子ドットにおける量子準位構造のテラヘルツ分光に関する研究」) と題し、単一自己組織化 InAs 量子ドット内の量子準位間遷移の観測とその解析について論じたものである。論文は7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、本研究の背景と目的について述べられている。自己組織化 InAs 量子ドットに関して、様々なデバイスへの応用とともに、電子状態やダイナミクスを解明しようという研究がなされてきた。特に、テラヘルツ電磁波の有効性は早くから認識され、量子ドットアンサンブルのテラヘルツ分光や走査プローブ顕微鏡を用いた単一量子ドットのテラヘルツ分光の研究がなされてきた。しかし、ドットサイズの不均一性や室温での測定のために、量子ドット内の電子状態に関する詳細な議論ができるレベルには達しておらず、テラヘルツ電磁波を用いた単一量子ドットの精密な分光が必要であると述べている。

第2章では、単一量子ドットに金属電極を形成したトランジスタ (単一量子ドットトランジスタ) 構造の動作を理解する上で重要となる単一電子トランジスタの伝導機構とその特徴について概説している。さらに、量子ドットにテラヘルツ電磁波を照射したときに期待される量子準位間遷移の選択則や光電流の生成機構についても説明している。

第3章では、まずテラヘルツ電磁波を用いて単一量子ドットのテラヘルツ分光を行う上での課題が論じられている。その第一は長波長のテラヘルツ電磁波を直径数十 nm の量子ドットにいかに集光するかという問題であり、第二は単一量子ドットによる微弱な光吸収信号をいかに検出するかという問題である。これらの問題に対して、単一量子ドットに形成した金属電極をアンテナとして用いることによりテラヘルツ電磁波を単一量子ドットに集光するとともに、試料そのものを検出器として用いて光誘起電流を検出することにより、これまでの課題を克服することができると提案している。さらに、測定系や試料作製の詳細、試料に要求される条件などが述べられている。

第4章では、作製された単一量子ドットトランジスタ試料に対して、ゲート電圧やドレイン電圧を変化させて、精密な伝導特性の測定を行い、量子ドットの帯電エネルギーや励

起準位のエネルギーに関する考察を行っている。さらに、試料にテラヘルツ電磁波を照射したときに現れる光電流を、ゲート電圧、ドレイン電圧の関数として測定し、従来考えられてきた光電流生成機構のみでは理解できない成分があることを発見した。量子ドット系に対する全エネルギーを見積もることにより、この新しい電流成分が過渡的に電子が1個過剰に量子ドット内に入る新しい光電流生成過程 ($N \leftrightarrow N+1$ 励起) によるものであることを見いだした。またレート方程式より、光励起電流観測に必要な条件などについても議論している。

第5章では、テラヘルツ誘起光電流をフーリエ分光することにより、単一量子ドット内の量子準位間遷移のスペクトルについて議論している。自己組織化 InAs 量子ドットは、わずかに異方性を持っており、量子準位は分裂している。本論文では、そのような分裂した p 軌道から d 軌道への遷移に関して詳しく論じ、遷移の選択則と遷移確率の大きさ、異方性による軌道の分裂、電子間のクーロン反発力の効果などを考慮することにより、遷移スペクトルの形状をよく理解できることを示している。さらに、p 殻が半分占有されている電子数4の状態では、p 殻の占有のされ方(配位)に自由度があり、ゲート電圧に対して複雑な振る舞いをするを見いだしている。

第6章では、伝導測定とテラヘルツ測定から得られる励起準位のエネルギーの比較を行っている。第5章までに論じた量子ドットにおいては、伝導測定から求めた励起準位エネルギーよりもテラヘルツ測定から求めたそれの方が数 meV 大きいことがわかった。さらに量子ドットを一方向に引き伸ばした量子ダッシュと呼ばれる構造においては、多数の電子が存在し、この差は 10 meV 程度と非常に大きいことがわかった。この励起エネルギーの差は、多体系の波動関数と電子間相互作用を考慮したときに、遷移選択則に支配される光学遷移と電極からのトンネル注入による伝導過程の差として理解できることを示している。

第7章は結論であり、博士論文全体を通してのまとめが記されている。

以上のように本論文は、ナノギャップ金属電極を用いてテラヘルツ電磁波をナノメートル領域に集光し、光励起された電流を計測することにより、単一自己組織化量子ドット中のサブレベル間遷移スペクトルの精密な測定に成功するとともに、量子ドットの異方性や遷移選択則、電子間相互作用、軌道の電子配位などがスペクトルに与える影響を明らかにしたものであり、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。