

論文審査の結果の要旨

氏名 鈴木 剛

半導体に光を照射すると、電子と正孔が等量生成される。電子と正孔には強いクーロン相互作用が働き、密度や温度に応じて量子多体系として多彩な物質相を示す。低温でかつ低密度では、一对の電子と正孔が励起子と呼ばれる束縛状態を形成する。励起子は中性のボース粒子で、密度を上昇させると、電子正孔のクーロン相互作用が遮蔽され、束縛状態が不安定化し、金属的な電子と正孔のプラズマ状態に転移すると予想される。この励起子ガスから電子正孔プラズマへの転移は、絶縁体相から金属相への転移であり、励起子モット転移と呼ばれている。励起子モット転移は電子と正孔という量子性が強く働く粒子がクーロン相互作用する中で生じる量子多体现象であり、長年研究が進められてきた。しかし、多電子相関効果、キャリアの有限寿命効果、非平衡性などが影響する現象であり、その本質は未解明である。

近年、パルスレーザー技術の進歩により、周波数が 0.1~10 テラヘルツ (THz) 程度の領域の電磁波、テラヘルツ波、の発生検出技術が開拓されてきた。この周波数領域は伝導現象と光学現象を繋ぐ領域であり、半導体のキャリアの高速運動を誘電応答として捉えることが可能である。テラヘルツ波のエネルギースケールは励起子束縛エネルギーなど電子正孔の相互作用を特徴づけるエネルギー領域と合致しており、電子正孔系の物質相の特徴を調べる手法として有効である。

本研究は、パルスレーザー光を光源とし、高帯域のテラヘルツプローブパルスが発生し、光パルスで励起された半導体のキャリアの挙動をテラヘルツ時間領域分光法によって系統的に調べ、3次元電子正孔系における励起子モット転移について新たな知見を得ることを目的とした。

本論文は、7章から構成されている。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、本研究の主題である励起子モット転移について述べ、研究の背景および目的を述べ、本論文の構成について述べている。

第2章では、理論的背景として、本研究で対象とした Si および GaAs の電子構造と光学応答について述べ、さらに半導体におけるクーロン相互作用の遮蔽効果について説明している。

第3章では、本研究の実験に用いた薄膜 Si 試料と GaAs 試料について述べている。続いて、本研究で用いた広帯域テラヘルツ時間分解分光法について光源発生および検出法の原理と実験装置について述べている。さらに GaAs 試料で用いた、波形整形法を用いたポンププローブ分光法について説明している。

第4章では、間接遷移型半導体である Si についてパルス光照射下で、3-25meV に及ぶ広いエネルギー領域で、光励起電子正孔系の誘電応答関数を評価した実験について述べている。試料を 30K に保持し、パルス励起から 4 ナノ秒後で電子正孔系がほぼ準熱平衡に達した状況で励起密度依存性を調べた。ランダム位相近似理論で予想されるモット転移密度で自由キャリア成分の顕著な増大が観測されたが、この密度以上でも励起子内部 1 s - 2 p 遷移に起因する構造がほぼ同じ共鳴位置に存在することが見いだされた。従来、励起子モット転移はバンドギャップの収縮と励起子束縛エネルギーの縮小が同時に起こることによって生じるとされてきたが、この実験結果はこの常識を覆すものとなった。また損失関数を評価し、自由キャリアのプラズモンおよび励起子内部遷移の共鳴特性を抽出し、緩和定数の温度依存性やプラズモンと励起子内部共鳴遷移の結合などの現象を捉えた。

第5章では Si において実験で求めた誘電応答関数から励起子のイオン化率を抽出し、温度と密度を変数として電子正孔系の相関を決定した。高温領域では、電子正孔と励起子の乖離結合反応における質量作用の法則に従う熱力学的な安定性によりイオン化率が決まる様子が見られた。低温領域ではクーロン遮蔽効果により高密度化によって励起子が乖離する様子を捉えた。

第6章では直接遷移型半導体 GaAs を用いた実験について述べている。波形整形法を用いてパルス光の切り出しを行い励起子共鳴励起を行う手法を開拓した。共鳴励起下ではあるが、励起子応答が観測されず、励起直後に励起子がプラズマに乖離することが見いだされた。その微視的機構は未解明である。

以上のように、本研究では、時間領域テラヘルツ分光法を用いて、光励起キャリアの誘電応答を系統的かつ定量的に評価する実験手法を開拓し、3次元の電子正孔系における励起子モット転移について新しい知見を得たものである。また、テラヘルツ分光法が電子正孔系の相関効果やダイナミクスを捉える方法として活用できることを示した。

本研究の成果は物性物理学、光物理学両面にとって意義のあるものであり、今後の発展に大きく寄与することが期待できる。なお、本研究は、島野亮氏との共同で行われたが、論文提出者が主体となって、実験の実施、結果の解析と考察を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断した。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。