

論文審査の結果の要旨

氏名 関口 文哉

本論文では、半導体に光照射して生成される多数の電子正孔対集団を対象とし、テラヘルツ分光法の最新の実験技術を駆使し、励起子モット転移（電子と正孔が束縛している励起子状態から電子と正孔が乖離しているプラズマ状態への転移）近傍での多体相関効果を明らかにした成果が報告されている。

半導体中に光励起された電子と正孔が水素原子様に束縛された状態を励起子というが、それは電荷中性な擬ボゾンなので、励起子が多数存在している状態である「励起子相」は絶縁体といえる。しかし、励起子の密度が上がるにつれ、電子と正孔間のクーロン相互作用が他の電子正孔によって遮蔽されて短距離化して弱まり、その結果、励起子が乖離して「電子正孔プラズマ相」に移り変わって金属状態となる。この絶縁体-金属転移である励起子モット転移は、極低温で期待されている BEC-BCS クロスオーバーを考える上での出発点であると同時に、凝縮系に普遍的な多体効果を内包しているため、凝縮系物理学の研究対象として極めて興味深い。

本研究では、テラヘルツ分光法の最新の実験技術を駆使し、励起子濃度を制御しながら、励起子や電子正孔プラズマの生成消滅過程のダイナミクスをピコ秒の時間分解能で計測した。その結果、励起子モット転移近傍での多体相関の性質や特異的に強い相関を持つ金属状態が過渡的に形成されることを発見し、モット転移の本質的な問題（低温でモット転移が 1 次転移になるなど異常を示す可能性）に新たな知見をもたらしている。

本論文は 5 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景として、励起子および励起子モット転移に関する基礎的知識と先行研究を概観し、その中から生まれた問題意識および本研究の目的が述べられている。

第 2 章では、本研究で使用した実験手法であるテラヘルツ時間領域分光法について、その原理と使用した装置、データ解析法について述

べている。

第3章では、一つ目の研究成果であるゲルマニウム (Ge) 結晶中での励起子に関する研究結果を述べている。Ge は間接遷移型半導体であるため、光励起された電子正孔がマイクロ秒程度の長い寿命を持ち、そのため電子正孔系が格子系と準熱平衡状態となる。比較的高温領域の測定の結果、励起子が電子正孔プラズマに乖離する励起子イオン化率は励起子密度の変化に対して連続的に変化するクロスオーバーとして観測されたこと、また励起子密度の増加にも関わらず励起子の電子正孔相互作用エネルギーは変化しないことを発見した。これらは、励起子密度の増加に伴って電子正孔間の相互作用が弱まるという従来の励起子モット転移の描像と相容れないものであり、励起子相関の性質が遮蔽効果に対して鈍感 (ロバスト) であることを示唆している。先行研究でのシリコン結晶中の励起子でも同様の現象が見出されていたので、半導体電子正孔系に普遍的な性質であるといえる。

第4章では、二つ目の研究成果である、ヒ化ガリウム (GaAs) 結晶中での励起子モット転移の結果を述べている。ここでは、レーザーエネルギーをチューニングして励起子状態を共鳴的に励起したり、電子正孔プラズマ状態を優先的に励起したりできるように工夫した。また、プローブに用いるテラヘルツ波の電場強度に依存して誘電率スペクトルが変化し、この変化が励起子のイオン化過程を反映していることを発見した。このテラヘルツ電場に対するスペクトルの変化を利用して、電子正孔相関の効果を実験的に抽出する手段を考案した。これらの励起法・検出法を用いて、まず、電子正孔プラズマを励起すると、その後冷却されて、1 ナノ秒程度の時間をかけて励起子が形成されていくことがわかった。また、水素原子様の励起子を共鳴的に励起すると、励起子モット転移を起こす高密度の励起では、10 ピコ秒程度の時間をかけて特異な相関を持つ異常金属相が一時的に形成され、それが50ピコ秒程度の時間をかけて消失して自由な電子正孔プラズマ状態になっていくことを発見した。この励起子が過密な状態で過渡的に形成される異常金属相は低エネルギー領域の光学伝導度が減少し、その代わりに高エネルギー側の伝導度が増大するという特長をもち、電子正孔 BCS 状態の前駆現象か、またはモット転移が1次相転移性を獲得したこと

による空間不均一状態と解釈できる可能性がある。この異常金属相は、励起子共鳴励起によって低温で実現する特異な電子正孔相関の現れであり、長く議論されてきた低温でのモット転移の異常に密接に関係していると考えられる。

第5章では本論文で明らかにされた結果とその意義がまとめられており、さらに今後の研究の展望が述べられている。

以上のように、論文提出者は、半導体結晶中に励起された電子正孔の集団に関して、最新のテラヘルツ分光実験手法を適用し、電子正孔間の相関に起因する励起子モット転移の性質を明らかにした。そのために、実験方法だけでなくデータ処理法を独自に考案し、その明瞭な物理的描像を抽出することに成功している。これらは世界的にも初めてとなる成果である。この成果は、凝縮系に普遍的に見られるさまざまな多体相関現象に関して有用な知見を与えるものである。よって、本研究の物性物理学としての価値と独創性は十分であると認められ、博士（理学）の学位論文としてふさわしい内容をもつものと認定し、審査員全員で合格と判定した。なお、本論文は、共同研究者らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験の遂行や結果の解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断した。