

# 論文審査の結果の要旨

氏名 室谷 悠太

固体中ではバンドの構造によって、負の電荷をもつ電子と、正の電荷をもつ正孔とが存在し得る。これをうまく利用すれば、電子と正孔の集団が共存する系が実現できる。このような電子正孔系は理論的に提案され、興味ある物性を示すことが期待されている。低密度の場合、電子と正孔はクーロン引力を通して励起子と呼ばれる束縛状態を作り、その系が低温になるとボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) を起こすと考えられる。一方、高密度の場合には、クーロン引力は遮蔽されてプラズマ状態となる。この場合に低温になると、弱い引力により BCS 型の超伝導類似の状態になると期待されている。両者の移り変わりは連続であるとされ、BEC-BCS クロスオーバーと呼ばれる。

電子正孔系のこのような量子凝縮相は低温でしか実現できないと考えられ、また励起子や励起子凝縮に対する決定的な証拠を与える実験手法が確立されていないこともあって、いまだに明確に実証されていない。本研究は、この問題に対し、直接遷移型半導体にレーザー光を照射することによって電子正孔系を作り出し、同時に超短光パルスを探プローブとして状態を測定するという手法を用いて取り組んだものである。通常の方法では、電子正孔系の温度が上昇してしまい、低温の様子を調べることができないが、本研究では電子正孔系の基底状態である  $1s$  励起子を共鳴的に励起するという方法を採用することによって、温度上昇を抑えることに成功した。

本論文の第一章の序論と第二章の研究背景では、これまでの励起子の研究、BEC-BCS クロスオーバーの紹介、および非線形光学応答の理論、実験で用いる GaAs の物性についてまとめられている。第三章では実際に用いた試料、実験系、および過渡吸収分光法、非線形透過測定、四光波混合の測定法について述べられている。それに続く、第四~第六章が本論文での研究成果であり、第七章はまとめと結論に当てられている。

具体的には、まず第四章で過渡吸収分光法による結果が述べられている。励起するポンプ光の強度が弱い場合には、共鳴励起された励起子による吸収線が分裂する様子が見られた。これは、励起子が光子の衣をまとった状態 (ドレスト状態) になっていると解釈すれば理解できると議論されている。さらにポンプ光強度を強くし、電子正孔密度を上げていくと、高エネルギー側の吸収線はバンドギャップエネルギーに近づいていく様子が見られた。この振舞いは単純な励起子描像では理解できないが、平均場近似に基づく半導体ブロッホ方程式を用いた理論シミュレーションを併用することで、このときの状態が電子と正孔の BCS 的な対形成がなされた状態であると解釈できることを示した。

次に第五、第六章では、上記のように得られた BCS 的な状態をより詳しく調べるため、四

光波混合の測定実験を行い、その結果をまとめている。四光波混合測定とは、3つの光子を吸収または放出して、1つの光が出てくるものを測定するという手法である。第五章は予備的な実験の章で、結果がよく知られている非共鳴条件下で、四光波混合測定法が有効であることを確かめた。第六章が主な結果で、励起子が共鳴励起される条件下での四光波混合測定の結果を述べている。第四章の過渡吸収分光法の場合には連続吸収帯に重なってしまって分離しづらかったドレスト状態が、四光波混合測定では明瞭に観測できることを示した。さらに実験と並行して半導体ブロッホ方程式を用いた理論シミュレーションも行った。理論によると実験結果のおおまかな振舞いは再現できるが、いくつか再現できない点もあることが指摘された。これについては、高次の相関や遮蔽の効果を理論的に取り入れる必要があると議論されているが、これは将来の課題として残されている。

以上のように本研究では、半導体にレーザー光を照射することによって共鳴的に励起した電子正孔系を調べ、その結果、電子正孔密度が高くなると、レーザー光を照射している間、BCS的な状態が実現していると結論づけている。非常に難しい実験であるが、励起された状態の温度を下げる工夫や、四光波混合測定を行うなどの大きな進展があった。レーザー光の照射を止めると直ちに秩序が消失することや、BCS状態の直接的な証明ではなく理論シミュレーションを併用しての結論であるが、説得力のある興味ある結論を導いた点が大きく評価できる。

本研究は金昌秀、秋山英文、島野亮、L. N. Pfeiffer, K. W. West との共同研究であるが、論文提出者は、実験、理論シミュレーション、解釈などの点において本質的な寄与をしていると認められる。以上をもって審査員一同は、本論文が博士(理学)の学位を授与するにふさわしいものであると認定した。