

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 平山 康博

半導体量子構造ではその低次元性故に光励起下での励起子効果がひと際強い。近年、励起子に更に電荷が付随した荷電励起子が盛んに観測されるようになり、理論的解明も進んできた。これまで Si や GaAs 等の III-V 族化合物半導体を用いた低次元量子構造での荷電励起子の報告が多いが、極性が強く励起子効果が顕著である II-VI 族半導体低次元系においても荷電励起子に関する多くの研究が盛んになされている。荷電励起子の光学スペクトルは構成電荷のスピン状態により大きく影響される。従って、荷電励起子は強磁場環境ではその系のスピン状態に応じて一重項及び三重項荷電励起子に分類され多様な振る舞いを示す。また、荷電励起子はその励起状態だけでなく基底状態のスピン状態にも大きく作用される点が励起子とは異なる点であり、荷電励起子光学スペクトルを詳細に調べることにより、基底状態のスピン情報をも得ることに繋がる。

磁場下での荷電励起子光学スペクトルは、ゼーマン分裂と束縛エネルギーの変化に大きく作用される。荷電励起子の束縛エネルギーはその種類に大きく依存し、強磁場での一重項及び三重項荷電励起子の束縛エネルギーに関しては、それぞれ実験及び理論の詳細な研究がなされている。結局は、荷電励起子を構成する 3 体問題とクーロン遮蔽に寄与する電子相関の強磁場での問題に帰着することになる。

本論文では希薄磁性半導体(Cd,Mn)Te 量子井戸構造を用いて、超強磁場での一重項及び三重項荷電励起子の振る舞いを明らかにしようとした。Mn スピンによる内部磁場を外部磁場で打ち消すことにより電子のゼーマン分裂を限りなく零に抑えることができる。このことを上手く利用して超強磁場下での一重項及び三重項荷電励起子の同時観測を実現した。これまで強磁場の発光過程では、後者のゼーマン分裂による低エネルギーシフトが障害となり前者の観測は困難であった。変調ドープされた n 型の量子井戸(Cd,Mn)Te/(Cd,Mg)Te では磁場印加により多彩な磁気発光スペクトルが観測される。本論文では先ず超伝導マグネットを用いて定常磁気発光及びピコ秒時間分解発光から得られるダイナミクスから多様に現れる磁気発光スペクトルの同定を行った。さらに、強磁場領域を調べるために非破壊ロングパルス強磁場及び一巻きコイルショートパルス超強磁場を用いた発光及び吸収スペクトルの高精度測定技術開発を進め、系統的な測定と解析を行った。ここで、量子井戸の僅か 10 nm 1 層という微小領域からの発光及び吸収測定を 1 ns というこれまでの 1000 分の 1 の露光時間での光計測を超強磁場下で可能にしたことは特筆に値する。超強磁場までの全磁場領域での発光ピークの同定を行った結果、弱磁場では一重項荷電励起子、及び最低ランダウ準位間遷移の発光が観測され、7 T 以上では三重項荷電励起子遷移が強くなることを確認した。電子の充填率 $\nu < 2$ の強磁場極限では最低ランダウ準位の「隠れた対称性」が顕在化し、電子・正孔間の実質的クーロン相互作用が強くなり、これらの束縛エネルギーの増大が見られ、発光スペクトルが単純になる。このことにより磁気発光スペクトルは単純な 2 本の線に集約する。そこで、50 T 以上の強磁場では再び一重項荷電励起子の発光が観測されるようになり、100 T 以上で一重項荷電励起子発光が支配的になることを明

らかにした。ここで、一重項及び三重項荷電励起子の「隠れた交差」が起きていることを示した。さらに一重項及び三重項荷電励起子発光の同時観測をうまく利用して基底状態である伝導帯電子のランデ因子を決定することに成功し、100 Tを超える超強磁場までの振る舞いを明らかにした。これに $k \cdot p$ 摂動計算を拡張しスピン交換相互作用を取り入れた修正ピジョン・ブラウンモデル (PB) を適用し、実験結果とのよい一致をみた。最後に、超強磁場の一重項及び三重項荷電励起子の束縛エネルギーに関する情報を得た。これから磁場とともに一重項荷電励起子の束縛エネルギーが増大することを示した。このことは既存の理論では予測されていない。超強磁場によって電子の実効的量子閉じ込めが弱くなったことが原因であると結論付けた。本論文は以下の構成からなる。

第 1 章では、これまで半導体二次元電子系で行われてきた磁気光学的研究について広く述べている。特に、強磁場下での荷電励起子の光学的特徴を紹介し、未解決の問題を指摘し、本研究の動機を示した。第 2 章では、半導体二次元電子系における基礎的な光物性と、希薄磁性半導体(Cd,Mn)Teの特性を述べ、ここで実現する荷電励起子についてのこれまでの研究を述べている。また、電子スピン状態の摂動計算のため修正PBモデルを用いた計算を行った。第 3 章では、使用した試料の詳細、作成した非破壊型ロングパルスマグネットについて、また、より強磁場発生のための非破壊パルスマグネット「一巻きコイル法」と、これによる構築した磁気光学測定系の詳細を述べている。第 4 章では、10 T以下の弱磁場領域での磁気発光測定と時間分解分光測定の結果を示し、多様に現れる磁気光学スペクトルの発光線の同定を試みている。第 5 章では、パルス強磁場での磁気発光測定について述べている。磁気発光スペクトルの温度依存性から強磁場領域での発光線の同定を行い、強磁場で三重項だけでなく一重項荷電励起子遷移も観測されることを示した。また 100 Tを超える超強磁場での発光ピークエネルギーから、一重項荷電励起子の束縛エネルギーについての新たな知見を得ている。一重項、三重項荷電励起子の発光強度比からこれらのスピン分裂を決定した。この荷電励起子のエネルギー状態は、伝導帯のスピン分裂と束縛エネルギーで決まることを示した。また、一重項及び三重項荷電励起子の強磁場発光過程から伝導帯電子のスピン状態を決めることを行い、修正PBによる伝導帯のスピン分裂の計算と比較検討している。さらに、直接的に伝導帯のスピン分裂の様子を探るため荷電励起子の励起過程、すなわち吸収測定を行った。その結果、吸収測定で得られる伝導帯のスピン分裂の情報は発光測定から得られた結果と一致することを示した。最後に、第 6 章で本研究をまとめている。

以上のように、本論文では複雑な実験システムの工夫により、希薄磁性半導体量子構造における 2次元電子系を用いて 100 Tを超える超強磁場までの磁気光学測定を成功させた。ここで、自由電子が高濃度状態であっても超強磁場環境では荷電励起子束縛状態が安定化し、これによる光遷移が支配的になることを示した。また、ここで実現する一重項荷電励起子の束縛が磁場とともに強くなることを明らかにし、光励起で実現する電子・正孔の超強磁場での 3体及び多体問題に関する新しい知見を得ることに成功したといえる。

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。