

学位論文題名

磁場中の 2 電子束縛状態と電子相関

学位論文内容の要旨

半導体中においては、キャリア濃度を増やすために不純物がドーピングされる。最近の量子ホール効果やメゾスコピック系の主な舞台となる半導体ヘテロ接合界面においても、界面付近に 2 次元電子系 (2DES) を形成するためにやはり不純物がドーピングされる。ヘテロ接合界面付近に形成される 2DES は、低温でのイオン化不純物による散乱の影響が小さいために高速電子デバイスへの応用が期待されている。2DES の伝導特性は、半導体中の不純物準位などに対する理解がまだ不十分であるために、完全には理解されていない。

そこで半導体中に形成される不純物準位に注目する。半導体中にドーピングされた浅い不純物 (D^0 センター) は有効質量近似の範囲内で水素原子的に扱われる。そのような D^0 センターは 1 つの余分な電子を束縛することにより、 D^- センターと呼ばれる系を形成する。半導体中の D^- センターは、電気的に中性な水素原子 (H) が 1 つの余分な電子を束縛することによって形成される負の水素イオン (H^-) と類似な系であり、最も簡単な少数電子系の 1 つである。近年の結晶成長技術の進歩により、この D^- センターはバルク半導体中よりも GaAs/AlGaAs 多重量子井戸中においてより安定に存在する。ここでは量子井戸中に形成される準 2 次元的な D^- センターに磁場をかけた系を取り上げる。このような系は次元の減少と磁場の効果によって電子間の相関効果が強められ、電子の多体効果を研究するために最も適した系の 1 つである。

本論文は、全 5 章から構成される。以下では、各章の内容を簡単に説明する。

第 1 章は序論に当てられ、本研究の背景と目的が述べられる。これまでの準 2 次元 D^- センターに関する研究のほとんどは、量子井戸の中心に不純物を δ ドーピングした系に対するものであった。最近、Fox らは井戸中の不純物の位置が中心からずれた場合の準 2 次元 D^- センターに対する最も簡単なモデルの 1 つであるバリア D^- センターのモデルを提案した。彼らは、強磁場極限において、バリア D^- センターの問題に対する厳密解が存在すること、および正イオンの 2 次元平面からの距離の関数としてこの系の基底状態が角運動量 $L=0 \sim -5$ を持つ状態間で変わることを示した。Marmorkos らは量子井戸中に形成される準 2 次元 D^- センターの問題において不純物が井戸の中心から離れて障壁中にある場合を考えた。彼らは、磁場中において角運動量 $L=0 \sim -2$ を持つ状態に関する基底状態の遷移と電子相関の振る舞いについて調べた。そして彼らは D^- センターの基底状態の遷移とこの系の電子相関の間に密接な関係があることを示した。

多重量子井戸において井戸中の不純物の位置が中心からずれた場合に起きる磁場中の準 2 次元 D^- センターの基底状態の遷移は大変興味深い現象である。バリア D^- センターはこのような系に対する非常に単純化されたモデルではあるが、準 2 次元 D^- センターの基底状態の遷移の本質をよく表わすモデルであると考えられる。そこで本研究においては、バリア D^- センターの問題に対して以下に示す 2 点を明らかにすることを目的とする。1 つは、有限磁場領域におけるバリア D^- センターの振る舞いに関連している。ここでは

強磁場極限における厳密解を用いて Fox らによって示されたバリア D^- センターの基底状態の遷移が有限磁場領域においてどのように変更を受けるかについて調べる。他の 1 つは、磁場中のバリア D^- センターの基底状態の遷移と電子相関の関係を明らかにすることである。この関係は Marmorkos らによって準 2 次元 D^- センターの小さい角運動量を持つ状態に対して調べられたが、本研究ではより大きな角運動量を持つ状態まで含めて議論する。

第 2 章では、Fox らによって示された強磁場極限におけるバリア D^- センターの厳密解に対する結果について簡単なレビューを行う。バリア D^- センターのモデルは 2 次元平面よりある距離だけ離れた位置に固定された正イオンとそのイオンに束縛された 2 次元平面内の 2 個の電子から成る。この系は、 z -軸の周りの回転と 2 電子間の入れ替えに対して不変であり、この系の固有状態は全角運動量の z -成分と 2 電子の入れ替えに対する対称性(スピン 1 重項あるいはスピン 3 重項)によって指定される。強磁場極限において最低ランダウ準位のみを考慮すれば、この系の厳密解が得られる。

第 3 章では、直接対角化法を用いて有限磁場領域におけるバリア D^- センターの振る舞いを調べた。直接対角化法は、強磁場極限において Fox らが用いた方法を、有限磁場領域において高いランダウ準位からの寄与を考慮することにより拡張したものである。この方法においてはさまざまな角運動量を持つ状態を同等に扱うことができ、得られた結果は容易に Fox らの結果と比較することができる。計算の結果、磁場の強さや正イオンの 2 次元平面からの距離が大きくなると高いランダウ準位の効果は小さくなることが分かった。強磁場極限において Fox らが示したバリア D^- センターの基底状態の遷移は、有限磁場領域においても起こる。また、磁場の強さや正イオンの 2 次元平面からの距離が十分大きくなるとバリア D^- 状態の蒸発が起き、角運動量 $|L| > 5$ を持つ状態が束縛されることはなかった。我々の計算によって得られたバリア D^- センターの基底状態に対する相図は、磁場中のバリア D^- センターの基底状態の遷移が非常に幅の狭い量子井戸中に形成される D^- 状態に関する実験において観測され得ることを示している。

第 4 章では、変分法を用いて磁場中のバリア D^- センターの基底状態の遷移と電子相関の関係を調べた。変分法は、直接対角化法に比べて決定すべきパラメータの数が少なく、また物理的描像もより明かである。ここでは強磁場極限における厳密解をもとにさまざまな角運動量を持つ状態に対するチャンドラセカール型の変分関数を構築した。変分法によって得られたバリア D^- 状態のエネルギーを直接対角化法によるものと比較した結果、我々の変分計算がさまざまな角運動量を持つバリア D^- 状態に対して十分良い近似になっていることが分かった。変分法によっても有限磁場領域においてバリア D^- センターの基底状態の遷移が起こることが示され、またそのような遷移が起きるときに電子密度、角度相関および 2 電子間の平均距離などの物理量に強い電子相関の効果が現れる。基底状態の遷移と電子相関の関係を詳しく調べた結果、各バリア D^- 状態において現われる強い電子相関が磁場中のバリア D^- センターの基底状態の遷移を引き起こすものと理解することができる。

第 5 章は、本研究において得られた成果のまとめに当てられる。本研究においては、磁場中のバリア D^- センターの基底状態の遷移に関する新しい知見を得た。このような D^- センターの基底状態の遷移が実際に量子井戸中に形成される D^- 状態に関する実験において観測されるものと期待される。

学位論文審査の要旨

主査 教授 徳田 直樹
副査 教授 中山 恒義
副査 教授 田村 信一郎

学位論文題名

磁場中の 2 電子束縛状態と電子相関

近年、半導体ヘテロ接合界面に形成される低次元電子系に関する研究が盛んに行われている。その多くは不純物の少ない高移動度電子系に対する量子輸送現象の解明を目的としており、低電子濃度の系における不純物の影響、あるいは不純物準位そのものの理解は十分に得られておらず、今後の発展が待たれる状況にある。

本論文は、このような現況のもとで、半導体量子井戸中に形成される不純物準位、特に D^- センターについて、不純物の位置や印加する磁場の強さを変化させることによりその量子力学的状態を理論的に調べたものである。 D^- センターは、半導体中の中性ドナー不純物に余分に 1 つの電子が束縛されることにより形成される。これは、負の水素イオン (H^-) と類似な系であり、最も簡単な多体電子系の 1 つである。量子井戸中に形成される不純物準位の問題は、工学的には高速電子デバイスにおける不純物の影響を調べる上で重要である。またこの系に磁場をかけた問題は、次元数の減少および磁場による閉じ込めのために電子の相関効果が強められるので、少数電子系における電子間相互作用の影響を検証する上で物理的にも重要である。本論文は全 5 章からなり、その主要な成果は次のように要約される。

第 1 章では、本研究の背景と目的が述べられている。最近の研究により、不純物イオンによって束縛された 2 電子系の基底状態が不純物の位置の関数として遷移することが強磁場極限における厳密解を用いて示されており、また、この基底状態の遷移とその系の電子相関との間に密接な関係があることが示唆されている。本研究では、有限磁場領域における 2 電子束縛状態の振る舞い、およびその系の基底状態の遷移と電子相関の関係を明らかにすることの重要性が指摘されている。

第 2 章では、強磁場極限において示された 2 電子束縛状態に対する厳密解に関して簡単な説明が行われている。強磁場極限において最低ランダウ準位のみを考慮すると、この問題に対する厳密解が存在し、この極限で異なる角運動量を持つ状態間で基底状態の遷移が起こることが示されている。

第 3 章では、直接対角化法を用いて有限磁場領域における 2 電子束縛状態の振る舞いが調べられている。直接対角化法は、強磁場極限での方法を有限磁場領域において

高いランダウ準位からの寄与を考慮することにより拡張したものであり、この方法においてはさまざまな角運動量を持つ状態を同等に扱うことができる。計算の結果、強磁場極限において示された基底状態の遷移が、有限磁場領域においても印加した磁場の強さや不純物イオンの位置の関数として起こることを明らかにしている。

第 4 章では、変分法を用いて磁場中の基底状態の遷移と電子相関の関係が調べられている。変分法は、直接対角化法に比べて決定すべきパラメータの数が少なく、また物理的描像もより明らかである。ここでは強磁場極限における厳密解をもとにさまざまな角運動量を持つ状態に対するチャンドラセカール型の変分関数が提案されている。変分法によっても有限磁場領域において基底状態の遷移が起こることが示され、また遷移が起きるときに電子密度、角度相関および 2 電子間の平均距離などの物理量に強い電子相関の効果が現れることが示されている。基底状態の遷移と電子相関の関係を詳しく調べた結果、この系の 2 電子状態において実現する強い電子相関が磁場中の基底状態の遷移を引き起こすことを明らかにしている。

第 5 章は、本研究において得られた成果のまとめに当てられている。この研究で得られた基底状態に対する相関は、量子井戸中に存在する不純物準位の振る舞いに対し重要な情報を与えるものと期待される。

これを要するに、著者は、磁場をかけた半導体量子井戸中に形成される不純物準位 (D^- センター) について、磁場の強さが変化するとき、物理量の異なる状態間で基底状態の遷移が起こること、またその遷移の際に電子相関が重要な働きをしていることを示しており、応用物理学および量子物理工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。