

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 井海田 隆

近年、半導体微細加工技術の進展によって各種の低次元電子系の良質の試料がつくられるようになり、多くの新しい現象が見出されるようになった。特に強磁場中の低次元電子系については、種々の量子現象、電子間相互作用による新しい現象が見出されるとともに多くの新しい物理概念が生み出され、基礎物性、応用の両面から多くの研究がなされている。低次元電子系の強磁場物性は現代の物性物理学のもっとも重要な課題の一つとなっているが、未だに多くの未知の問題が残されている。パルス強磁場は従来にない大きな量子化を実現し、新たな現象の発見を生み出す可能性がある。

本論文は、「超強磁場サイクロトロン共鳴による半導体量子構造の電子状態の研究」と題し、数 100T に及ぶ超強磁場におけるサイクロトロン共鳴を手段として Si/SiGe 量子井戸における 2 次元電子系および PbSe/PbEuTe 自己形成量子ドットにおける電子状態を研究した結果をまとめたものである。低次元電子系の物性として重要と思われる問題のうち、電子間相互作用、量子ポテンシャルと磁場効果の競合による電子状態に焦点を当て、それぞれについて詳しい研究を行っている。

第 1 章「序」では、本研究の目的、意義、論文の概要などが述べられている。

第 2 章「研究の背景と目的」では、これまでになされてきた半導体低次元電子系における電子状態の量子化や電子間相互作用の研究から明らかにされてきたことと未解決の問題、また Si の 2 次元電子系および PbSe に関連する基礎物性や試料の特徴など、本研究の背景にある基本的問題の要約とそれを踏まえた本研究の目的が述べられている。

第 3 章「実験方法」では、種々の強磁場発生技術や遠赤外、赤外分光技術など本研究における強磁場下でのサイクロトロン共鳴の実験法が述べられている。特に申請者が大学院博士課程に進学した段階で柏新キャンパスにおける新超強磁場施設の建設が始まったが、非破壊型長時間パルスにおける実験装置は申請者がそこで開発を進めた新しい装置である。また弱磁場領域における実験は一部米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校の自由電子レーザーを用いて行われたが、その実験法についても述べられている。

第 4 章、第 5 章は本論文の中心をなすもので、本研究で得られた実験結果とその考察が議論されている。

第 4 章「実験結果と考察 —Si/SiGe 二次元電子系—」では、きわめて移動度の高い Si/SiGe 量子井戸における二次元電子系におけるサイクロトロン共鳴の実験結果とその解析が述べられている。超伝導マグネットによる 15 T までの磁場領域では、共鳴幅と有効質量がランダウ準位の占有率 ν とともに振動する現象を見出し、何らかのポテ

ンシャルの遮蔽効果が ν の変化とともに増減することによって電子間相互作用が振動的に変化するためとして説明した。また電子のサイクロトロン共鳴より質量の軽い共鳴ピークを見出し、その束縛エネルギーがドナー準位よりも 1 桁程度浅いことから界面のゆらぎ等に弱く捉えられた電子による共鳴と解釈し、前述の振動にもモード結合による寄与を与えている可能性を示唆した。また超強磁場における実験では共鳴ピークの強度が磁場の増加とともに急激に減少し、100T 以上の領域ではまったくみられなくなることを見出した。この原因についてはまだ明らかではないが、何らかの準位クロスオーバーまたはモード結合が起こっているものと推論している。

第 5 章「実験結果と考察 —PbSe/PbEuTe 自己形成量子ドット—」では、最近オーストリアグループによって開発され注目を集めている PbSe の量子ドットが 3 次元的に高密度に規則配列した試料についての超強磁場下のサイクロトロン共鳴の実験結果とその解析が述べられている。比較的弱磁場の領域では自由電子レーザーを用いて量子ドット特有の量子ポテンシャルと磁場効果の競合による準位の共鳴を観測し、量子ドットからの信号を同定した。このピークについて超強磁場下で測定を行い、ピークが分裂すること、分裂の様子が実験の繰り返し状況によって変わることから分裂がドットの周辺の歪みによるものであることを明らかにした。また共鳴ピークの積分強度が波長とともに非常に大きく変わることを見出し、これを多重量子ドット層中の光の干渉効果として説明した。さらに磁場の角度を傾けるとバルク結晶とは異なる角度依存性を示すことを明らかにした。量子ドットが等方的な球に近い構造であれば、超強磁場中でサイクロトロン半径が小さくなるとスペクトルは 3 次元系と同じになることが期待されるが、この結果は量子ドットの電子系がある程度 2 次元性を保ち、ランダウ準位—サブバンド結合の効果が現れているものと解釈した。その他、PbSe の Wetting 層や PbEuTe のマトリックス部分におけるサイクロトロン共鳴を観測し、PbSe 層への Te の拡散についての情報を得た。

第 6 章は総括である。

以上を要するに、本研究はメガガウス領域のパルス超強磁場から超伝導マグネットによる定常磁場まで広い磁場領域、波長領域でのサイクロトロン共鳴を手段として、Si/SiGe 量子井戸における二次元電子系および PbSe/PbEuTe 自己形成量子ドットについての系統的な研究を行い、この分野で多くの新しい知見を見出したものであり、物性物理学、物理工学の発展に寄与するところがきわめて大きい。

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。