

|           |                                                        |
|-----------|--------------------------------------------------------|
| 氏名        | すずき きょういち<br>鈴木 恭一                                     |
| 授与学位      | 博士(工学)                                                 |
| 学位授与年月日   | 平成16年3月10日                                             |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第4条第2項                                             |
| 最終学歴      | 平成5年3月<br>東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程前期課程修了                |
| 学位論文題目    | 電子-正孔共存系半導体ヘテロ構造における<br>磁場中での2次元キャリア相関に関する研究           |
| 論文審査委員    | 主査 東北大学教授 岡 泰夫 東北大学教授 近藤泰洋<br>東北大学教授 渡邊 誠 東北大学助教授 澤田安樹 |

## 論文内容要旨

バンドギャップの異なる半導体どうしを結晶成長させる半導体ヘテロ構造では、ポテンシャル井戸にキャリアが2次元的に閉じこめられる。その結果、バルク(3次元)では見られない2次元特有の物理現象が現れ、それを利用した電氣的、光学的素子応用がなされている。最も代表的な2次元特有の物理現象が、1980年に報告された量子ホール効果で、磁場により分離したエネルギーレベル(ランダウレベル)中のキャリアの占有率が整数になるときに、縦抵抗がゼロ、ホール抵抗が $h/ve^2$  ( $h$ :プランク定数、 $v$ :ランダウレベル占有率、 $e$ :素電荷)で量子化する現象である。このホール抵抗が基本量子物理量でのみ決まる事は、半導体物理のみならず、低温物理、場の量子論等にも大きなインパクトを与え、また、 $h/e^2$ は、抵抗標準として採用されるに至った。さらに、この量子ホール効果は、分数統計粒子等の多体系における新たな物理描像を生み出す分数量子ホール効果へとつながり、現在も盛んに研究が行われている。

一般的なヘテロ構造は、電子または正孔の一方のみをキャリアとしているのに対して、InAs/GaSb系では、適度な層厚において、InAs層の伝導帯下端よりもGaSb層の価電子帯上端が高エネルギーとなり、フェルミレベルがこのバンドの重複領域に位置すると、電子と正孔が近接した状態で共存することが可能となる。このため電子-正孔相関に起因した新たな物理現象が期待される。また、このInAs/GaSb系では、電子層-正孔層間のトンネリングを利用した電氣的、光学的素子の開発も進められている。

InAs/GaSb系において、電子、正孔が近接共存することにより現れる、これまで知られている最も代表的な現象が、共存系特有の量子ホール効果である。これは、電子、正孔のランダウレベル占有率( $\nu_e$ ,  $\nu_h$ )が同時に整数になるときに、縦抵抗がゼロ、ホール抵抗がその占有率の差である $h/|\nu_e - \nu_h|e^2$ で量子化するものである。この機構は不明であり、電子、正孔の量子ホール効果の重なりとされていた。

本研究は、InAs/GaSb ヘテロ構造において、理論的に予想されている新たな物理現象の実現や素子応用に際し重要な情報となると考えられる、磁場中でのキャリアの特性を調べることに、特に、これまで機構が不明であった共存系の量子ホール効果の解明を目的として行われた。

これまで、InAs/GaSb 系における伝導特性は様々な方法で調べられてきたが、そのほとんどの報告は、InAs 層と GaSb 層が隣り合った超格子または単一量子井戸構造で、電子-正孔距離の近い系のみを対象にしていた。そのため、観測される現象が電子、正孔の近接共存による寄与か、電子、正孔の独立の寄与か不明であった。これに対して、InAs/AlSb/GaSb ヘテロ構造を作製すると、AlSb は、InAs の伝導帯、GaSb の価電子帯両方にポテンシャルバリアとして働くので、AlSb 層の厚さにより電子-正孔距離を制御できる。

本研究では、まず、AlSb の厚さが異なる InAs/AlSb/GaSb ヘテロ構造について、膜面に垂直、平行磁場下での抵抗測定、垂直磁場下でのサイクロトロン共鳴測定を行い、電子-正孔共存系から独立系への移り変わりを調べた。その結果、垂直磁場下の抵抗測定では、AlSb 層が厚くなるとホール抵抗の量子化が崩れた。平行磁場下の測定では、AlSb 層が厚くなるにつれて、二端子抵抗に現れる極大の磁場位置が高磁場側に移り、最も AlSb 層の厚い試料では、磁場に対する抵抗変化がほとんど見られなかった。サイクロトロン共鳴においては、AlSb 層が厚い独立系の試料では、鋭い電子のサイクロトロン共鳴吸収ピークが観測された。AlSb 層が適度に薄い試料では、サイクロトロン共鳴吸収ピークの上に、シュブニコフ・ド・ハース振動と同じ周期の振動が現れた。AlSb 層が厚い試料ではこの振動が消失していることから、この振動は、電子によりスクリーニングされた正孔のポテンシャルにより電子が散乱される、Short-Range-Scattering であると結論づけられた。AlSb 層が無い電子-正孔距離の近い試料では、ブロードなピークを観測した。このことは、バンドの混声により、電子、正孔の区別が、もはや曖昧になっていると考えられる。全ての測定において、共存系と独立系のしきい値にあたる AlSb 層の厚さは一致した。従来の予想とは異なり、独立系では、共存系の量子ホール効果が起こり得ないことを明らかにした。

一般に伝導特性を調べるときには、キャリア濃度のゲート変調が有力な手段である。しかし、InAs/GaSb 系ヘテロ構造では、結晶品質や絶縁膜作製に問題があるため、ゲート変調が困難で、それが共存系の量子ホール効果の解明を妨げていた。そのため、電子、正孔のランダウレベル占有率が非整数の場合についての議論が皆無であった。本研究では、InAs/(AlSb)/GaSb ヘテロ構造におけるゲートによるキャリア濃度の変調を目指し、伝導性基板（バックゲート）上に構造を作製することで、キャリア濃度のゲート変調に成功した。特に、基板側に GaSb 正孔層、表面側に InAs 電子層を作製することで、電子濃度を固定したまま正孔濃度のみを制御することに成功した。この試料を用い共存系量子ホール効果の解明を目指した。

厚い AlSb バリアをもつバックゲート InAs/AlSb/GaSb 独立系においてゲート電圧を変えながら垂直磁場下で磁気抵抗測定を行ったところ、縦抵抗の極小パターンは、電子の整数占有率と正孔の整数占有率の交点に一致した。このことは、独立系では、電子、正孔の量子ホール効果は独立に起こり、重なって観測されることを示す。AlSb バリアなしのバックゲート InAs/GaSb 共存系 (InAs: 30 nm) の場合、独立系の場合とは大きくことなり、縦抵抗の極小パターンは、ネットキャリア (キャリア濃度:  $n_{\text{net}} = n - p$ ,  $n$ : 電子濃度,  $p$ : 正孔濃度) の整数占有率 ( $\nu_{\text{net}} = \nu_e - \nu_h$ ,  $\nu_e$ ,

$\nu_h$  は整数とは限らない) に沿って現れ、2次元電子のランダウレベルの非局在領域に対応する磁場位置に現れる縦抵抗の極大によって分断された。また、斜め磁場下での測定結果から、横方向の磁場成分があると、この極大が消失し、 $\nu_{net}$  に沿う極小が連続になった。InAs/GaSb 共存系 (InAs:18 nm) の垂直磁場下での測定の場合、上記の2次元電子の非局在領域に対応する縦抵抗極大が、低磁場側では観測されたが、高磁場側では消失した。この試料は、上記の試料よりもInAs 層厚が薄いので、わずかながら電子-正孔間距離が短く、バンドの混成が大きいことが予想される。

これらバックゲート構造試料における実験結果を下に、共存系の量子ホール効果を(1) 整数  $\nu_{net}$  に沿う量子ホール効果、(2) 2次元電子の非局在領域に対応する縦抵抗の極大の2点に分けて次のように考察した。この考え方により、本研究の実験結果および、これまで報告されていた共存系の量子ホール効果に関する実験結果を首尾一貫して説明することができる。

#### (1) 整数 $\nu_{net}$ に沿う量子ホール効果

バンドの混成を考慮すると、各バンドから派生するランダウレベルはアンチクロッシングする。その結果、高磁場でバンドの重複が解けることにより開いたバンドギャップは、最低次から、同じ順番の電子、正孔から派生したランダウレベルのアンチクロッシング点(電子、正孔が同濃度になる領域)を通過して低磁場側につながる(ミニギャップ)。このミニギャップをバンドギャップと考えると、改めて、ミニギャップの低エネルギー側が価電子帯、高エネルギー側が伝導帯となる。磁場がないとき、 $k_x k_y$  空間でフェルミ面を考えると、キャリアは、外側の電子的な円軌道と内側の正孔的ワーピング軌道とのドーナツ領域に満たされる電子となる。この領域の面積はネットキャリア濃度に対応する。磁場を印加しても電荷量は保存されるので、ミニギャップより高エネルギー側に存在する混成したランダウレベルをネットキャリアが満たすことで、整数  $\nu_{net}$  に沿う共存系の量子ホール効果が理解できる。

#### (2) 2次元電子の非局在領域に対応する縦抵抗の極大

整数  $\nu_{net}$  の条件においても、フェルミレベルがアンチクロッシングギャップの中間にあるとき、ランダウレベルの広がりがあるアンチクロッシングギャップよりも大きければ、フェルミレベルは非局在領域にかかり、縦抵抗の極大が予想される。本研究で用いた試料構造では、フェルミレベルは表面側で支配されるので、電子の非局在領域に対応する磁場位置において、フェルミレベルがアンチクロッシングギャップの中間に位置することになる。このため、バンドの混成が小さいときには、電子の非局在領域に対応する磁場位置で縦抵抗の極大が観測されることになる。斜め磁場下の測定結果は、膜面方向の磁場成分が、バンドの混成を増大させていることを示している。

結論として、本研究により、InAs/GaSb 電子-正孔共存系の磁場中における伝導特性の理解が進み、共存系の量子ホール効果が解明できた。本研究結果は、新たな物理現象の実現や素子応用に際し重要な情報となると考えられる。本研究により明らかになった伝導機構は、一般的に成り立つもので、InAs/GaSb 系に限らず、伝導帯と価電子帯が重複するような全てのヘテロ構造に適用する事ができる。

論文審査結果の要旨及び学力確認結果の要旨

|                   |                                                                                                 |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 論文提出者氏名           | 鈴木 恭一                                                                                           |
| 論文題目              | 電子-正孔共存系半導体ヘテロ構造における磁場中での2次元キャリア相関に関する研究                                                        |
| 論文審査及び<br>学力確認担当者 | 主査 岡 泰夫 教授                      近藤 泰洋 教授<br>渡邊 誠 教授                          澤田 安樹 助教授 (理学研究専攻) |

論文審査結果の要旨

InAs/GaSb 系ヘテロ構造は、InAs 層に電子、GaSb 層に正孔が存在し、互いに近接して共存することができる。本研究では、InAs の伝導帯、GaSb の価電子帯の両方に障壁層として働く AlSb 層を挿入した InAs/(AlSb)/GaSb ヘテロ構造について、AlSb 層の厚さにより電子と正孔の相関の大きさを変え、基礎的な物性である磁場中での伝導機構、特に電子-正孔共存系に特有の量子ホール効果を解明した。磁場中での伝導機構は、混成したランダウレベルで支配され、ネットキャリアがこの混成したランダウレベルを満たすことで、共存系の量子ホール効果が起こることを明らかにした。

論文は全5章で構成されている。

第1章は、序論であり、本研究の背景、目的、本論文の構成について述べている。

第2章は、2次元キャリアの諸特性についての記述であり、半導体ヘテロ構造の作製法、エネルギー構造、磁場中のキャリア状態、量子ホール効果について述べている。

第3章では、InAs/(AlSb)/GaSb ヘテロ構造の伝導特性について述べている。2次元電子系、電子-正孔独立系、電子-正孔共存系が、試料の構造を変えることにより制御でき、種々の構造の試料におけるキャリアの磁気伝導特性を、磁気抵抗測定、サイクロトロン共鳴測定により明らかにした。

第4章では、電子-正孔共存系の量子ホール効果を明らかにした結果について述べている。バックゲート構造試料における実験結果をもとに、共存系の量子ホール効果を、(1) 電子と正孔の2次元密度の差で与えられる「正味のキャリア(ネットキャリア)密度」のランダウレベル占有率 $\nu_{net}$ が整数となる条件に沿う量子ホール効果、(2) 2次元電子の非局在領域に対応する縦抵抗の極大値の存在という2つの点から考察している。これより本研究における実験結果、およびこれまで報告されていた共存系の量子ホール効果に関する実験結果を首尾一貫して説明することができることを明らかにした。

第5章は、結論であり、各章の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、InAs/GaSb 電子-正孔共存系の磁場中における伝導機構、量子ホール効果を明らかにし、伝導帯と価電子帯が混成するヘテロ構造に一般的に適用できる新たな知見を与えたものであり、応用物理学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。

学力確認結果の要旨

平成16年2月5日、審査委員ならびに関係教官出席のもとに、学力認定のための試問を行った結果、本人は応用物理学に関する十分な学力と研究所指導能力を有することを確認した。

なお、英学術論文に対する理解力から見て、外国語に対する学力も十分であることを認めた。

## 論文審査結果の要旨

InAs/GaSb 系ヘテロ構造は、InAs 層に電子、GaSb 層に正孔が存在し、互いに近接して共存することができる。本研究では、InAs の伝導帯、GaSb の価電子帯の両方に障壁層として働く AlSb 層を挿入した InAs/(AlSb)/GaSb ヘテロ構造について、AlSb 層の厚さにより電子と正孔の相関の大きさを変え、基礎的な物性である磁場中での伝導機構、特に電子-正孔共存系に特有の量子ホール効果を解明した。磁場中での伝導機構は、混成したランダウレベルで支配され、ネットキャリアがこの混成したランダウレベルを満たすことで、共存系の量子ホール効果が起こることを明らかにした。

論文は全 5 章で構成されている。

第 1 章は、序論であり、本研究の背景、目的、本論文の構成について述べている。

第 2 章は、2 次元キャリアの諸特性についての記述であり、半導体ヘテロ構造の作製法、エネルギー構造、磁場中のキャリア状態、量子ホール効果について述べている。

第 3 章では、InAs/(AlSb)/GaSb ヘテロ構造の伝導特性について述べている。2 次元電子系、電子-正孔独立系、電子-正孔共存系が、試料の構造を変えることにより制御でき、種々の構造の試料におけるキャリアの磁気伝導特性を、磁気抵抗測定、サイクロトロン共鳴測定により明らかにした。

第 4 章では、電子-正孔共存系の量子ホール効果を明らかにした結果について述べている。バックゲート構造試料における実験結果をもとに、共存系の量子ホール効果を、(1) 電子と正孔の 2 次元密度の差で与えられる「正味のキャリア（ネットキャリア）密度」のランダウレベル占有率  $\nu_{\text{net}}$  が整数となる条件に沿う量子ホール効果、(2) 2 次元電子の非局在領域に対応する縦抵抗の極大値の存在という 2 つの点から考察している。これより本研究における実験結果、およびこれまで報告されていた共存系の量子ホール効果に関する実験結果を首尾一貫して説明することができることを明らかにした。

第 5 章は、結論であり、各章の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、InAs/GaSb 電子-正孔共存系の磁場中における伝導機構、量子ホール効果を明らかにし、伝導帯と価電子帯が混成するヘテロ構造に一般的に適用できる新たな知見を与えたものであり、応用物理学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。