

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21244047

研究課題名(和文)半導体表面および界面の2次元系における新しい自由度と電子状態

研究課題名(英文)New approach to the physics of two dimensional electron systems

研究代表者

岡本 徹 (Okamoto, Tohru)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60245371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,100,000円、(間接経費) 10,830,000円

研究成果の概要(和文)：高移動度シリコン2次元電子系に対して、磁場に対する角度をその場制御しながら磁気抵抗効果の測定を行った。非整数のランダウ準位充填率においてランダウ準位交差を行ったところ、電子局在に相当する縦抵抗の明瞭なディップが観測された。

直流抵抗で金属的温度依存性を示す同系に対して、低温下でサイクロトロン共鳴の測定を行った。緩和時間は、直流抵抗から得られるものと同様の温度依存性を示した。

GaAs劈開表面に形成したPb単原子層膜における超伝導を調べた。実験結果は、大きなRashba分裂を持つ2次元金属に対して予想されていた空間変調を有する超伝導状態によって説明された。

研究成果の概要(英文)：We study magnetotransport in a high-mobility Si two-dimensional electron system by in situ tilting of the sample relative to the magnetic field. A pronounced dip in the longitudinal resistivity is observed during the Landau-level crossing process for noninteger filling factors. This indicates that electrons in the relevant Landau levels become localized at the coincidence.

Cyclotron resonance of two-dimensional electrons is studied at low temperatures for a high-mobility Si/SiGe which exhibits a metallic temperature dependence of dc resistivity. The relaxation time shows a negative temperature dependence, which is similar to that of the transport scattering time.

Two-dimensional (2D) superconductivity was studied by magnetotransport measurements on single-atomic-layer Pb films on a cleaved GaAs surface. The results are explained in terms of an inhomogeneous superconducting state predicted for 2D metals with a large Rashba spin splitting.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：表面・界面

1. 研究開始当初の背景

半導体 2 次元系の研究は長い歴史を持ち、整数・分数量子ホール効果の発見から 20 年以上たった申請時においても盛んに研究され続けていた。研究代表者のグループにおいて、独自に開発してきた技術から、いくつかの新しい研究の自由度が成長しつつあった。

2. 研究の目的

(1) 強磁場中で試料角度を変えると、サイクロトロンエネルギーとゼーマンエネルギーとの比が変化し、ランダウ準位交差が引き起こされる。交差するランダウ準位に擬スピンのアップとダウンを割り当てることにより、交差点をゼロ磁場とした磁性の問題となる。整数量子ホール領域においては、イジング強磁性が理論的に予測されており、実際、それに起因すると考えられる実験データも我々のものも含めて報告されていた。一方で、ランダウ準位占有率が非整数のときには必ずしも強磁性状態が基底状態とはならないが、このときの電子状態については研究がなかった。本研究では、を系統的に制御した条件化で実験を行い、新奇な量子状態探索することを目的の一つとした。

(2) ゼロ磁場下での金属絶縁体転移が Si-MOS などの強相関 2 次元電子系で観測されてから 10 年以上たったいたが、その機構は明らかにされていなかった。特に、極低温領域において温度の低下に伴う急激な抵抗の減少が現れる原因については、コンセンサスが得られていなかった。本研究では、電子散乱機構に関する知見を得るべく、サイクロトロン共鳴の実験を行い、共鳴線幅から得られる散乱時間と移動度から得られる散乱時間の絶対値、温度依存性、電子濃度依存性およびスピン偏極率に対する依存性を比較することを目的の一つとした。

(3) 半導体 2 次元電子系の輸送現象の研究は、ヘテロ構造や MOS 構造などの界面に形成された 2 次元系に限られてきたが、研究代表者のグループにおいて InAs や InSb を超高真空・極低温中で劈開して得られた清浄表面に金属原子を吸着させることにより誘起した 2 次元電子系の面内電気伝導が行われ、すでに量子ホール効果の観測などに成功していた。本研究では、表面吸着原子が半導体に電子を供出する機構を明らかにするとともに、この系ならではの新物性を探索することを目的の一つとした。

3. 研究の方法

(1) ランダウ準位占有率 (磁場の垂直成分) と温度を高精度で一定に保ったまま、トータル磁場を一定速度で変化させることのできるシステムを希釈冷凍機中に組み込んだ。

(2) 極低温でサイクロトロン共鳴実験を行うため、高感度ボロメータを開発した。また、ヘリウム 3 冷凍機中で、Si/SiGe 試料の温度をすばやく変化させることのできる断熱セルを開発した。さらに、平行磁場でスピン偏極率を制御した条件化で垂直磁場を変化させてサイクロトロン共鳴の実験を行うために、ベクトルマグネットを作製した。

(3) 化合物半導体の劈開表面に堆積させた金属原子の分布と電気伝導の関連を調べるために、走査トンネル顕微鏡を用いた測定と電気伝導測定を同時に行うことのできるシステムを開発した。

4. 研究成果

(1) 擬スピン自由度をもつ強磁場 2 次元系の基底状態の研究に関しては、Si/SiGe ヘテロ構造 2 次元電子系を用いて、軌道量子数とスピン状態が異なる 2 つのランダウ準位を磁場角度の調節により交差させ電気伝導測定を行った。遷移領域において出現するディップ構造に関して、同時に観測されたホール抵抗の異常や、他の充填率での実験結果とあわせた考察から、電子 (あるいはランダウ準位中の正孔) の局在化が起きていると結論した。ディップの幅の充填率依存性やヒステリシスの観測などから、局在領域において擬スピンが非偏極状態にあることは、ほぼ間違いないと思われる。先行研究の計算からの類推から、軌道量子数の異なる電子がそれぞれ正方格子状の副格子を形成する電子結晶が実現された可能性が示唆された。

Si/SiGe ヘテロ構造 2 次元電子系の谷の自由度に着目し、井戸幅の異なる 4 つの試料に対して磁場中の電気伝導測定を行い、井戸幅が狭くなるにつれて谷分離エネルギーが大きくなることを明らかにした。

(2) 自作した高感度ボロメータを用いて透過型のサイクロトロン共鳴の実験を Si/SiGe ヘテロ構造 2 次元電子系に対して行った。100GHz のミリ波照射時の共鳴吸収線幅から得られた緩和時間は、温度の低下とともに増大し、直流極限の電気抵抗から得られる散乱時間と似通った絶対値および温度依存性を示した。電子密度の低下に伴い、電気伝導から得られる散乱時間は急速に短くなっていくが、サイクロトロンから得られた散乱時間の減少は比較的緩やかであり、絶縁体領域でも生き残る兆候が観測された。このことは、一体描像では理解できず、電子の集団運動の重要性が示唆される。

また、自作したベクトルマグネットを用いて、スピン偏極下での測定を行った。強相関 2 次元電子系に見られる共通した特徴として、面内磁場印加に伴うスピン偏極によって電気抵抗が大きく増大することが挙げられるが、スピン偏極に伴いサイクロトロン共鳴吸収の線幅は増大し、電気抵抗から得られた

散乱時間と線幅から得られた散乱時間は、ともにスピン偏極に対して減少することが明らかになった。金属的温度依存性と同様に、散乱時間のスピン偏極率に対する依存性の原因となる機構についてのコンセンサスは得られていないが、本研究の成果が理論モデルに強い制限を与えるものと思われる。

(3) InAs 劈開表面上の Au のドナー準位を決定した。原子のイオン化エネルギーに対する関係は、これまで Cs, Na, Ag に対して得られていた経験則から予想されるものとほぼ一致した。また、劈開表面上の吸着原子の観察を行うため、走査型トンネル顕微鏡を導入し、極低温・超高真空中において、(a) 半導体試料の劈開、(b) ドナー原子の真空蒸着、(c) 表面観察と側面電極を用いた面内電気伝導の同時測定、を連続して行うためのシステムを構築した。これにより、これまで行ってきた蒸着量の見積りに大きな誤りがないことが確認された。さらに、InSb 劈開表面の2次元電子系において、強磁場中でのトンネル分光測定を行い、明瞭なランダウ準位を観測するとともに、線幅に対して Shubnikov-de Haas 振動との比較を行った。

新しい展開として、絶縁性 GaAs 基板上に金属超薄膜を作製し、超伝導の研究を行った。化合物半導体を上手に劈開すると原子レベルで平坦な表面が得られることを反映し、Pb と In の場合には、急冷凝縮法で作製した強い乱れが予想される系であるにもかかわらず、単原子層領域でも超伝導が観測された。Pb の単原子層膜に対して面内磁場を印加したところ、Pauli 限界をはるかに超える強い磁場に対しても超伝導転移温度はほとんど変化しないことが明らかになった。さらに、0.2%以下の精度で測定を行ったところ、磁場の2乗に比例してわずかに超伝導転移温度が減少することが明らかになった。この実験結果は、強い Rashba 相互作用をもつ2次元電子系の超伝導状態に対する理論研究において、不規則性が強い場合に予想されていた、秩序パラメータの位相が空間変調する超伝導状態を仮定することにより説明することができた。実験結果を再現するためにフィッティングパラメータとして用いた弾性散乱時間は、常伝導状態の電気抵抗から求めた値を良い一致を示した。また、In の単原子層膜では Pb 単原子層膜よりも超伝導の転移温度の平行磁場依存性が強く現れた。我々は、Rashba 相互作用が小さい場合に対して、理論の拡張を行い、実験結果を再現した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計18件)

T. Sekihara, R. Masutomi, and T. Okamoto,
Two-Dimensional Superconducting State of Monolayer Pb

Films Grown on GaAs(110) in a Strong Parallel Magnetic Field, *Physical Review Letters* **111**, 05700 (2013)、査読有

DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.057005

T. Chiba, R. Masutomi, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Okamoto, In-plane magnetic field dependence of cyclotron relaxation time in a Si two-dimensional electron system, *Physical Review B* **86**, 045310 (2012)、査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.86.045310

T. Okamoto, T. Mochizuki, M. Minowa, K. Komatsuzaki, and R. Masutomi, Magnetotransport in adsorbate-induced two-dimensional electron systems on cleaved InAs surfaces, *Journal of Applied Physics* **109**, 102416 (2011, invited paper)、査読有

DOI:10.1063/1.3578263

R. Masutomi, K. Sasaki, I. Yasuda, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Okamoto, Metallic Behavior of Cyclotron Relaxation Time in Two-Dimensional Systems, *Physical Review Letters* **106**, 196404 (2011)、査読有

DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.196404

K. Sasaki, R. Masutomi, K. Toyama, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Okamoto, Well-width dependence of valley splitting in Si/SiGe quantum wells, *Applied Physics Letters* **95**, 222109 (2009)、査読有

DOI:10.1063/1.3270539

T. Okamoto, K. Sasaki, K. Toyama, R. Masutomi, K. Sawano, and Y. Shiraki, Insulating phases induced by crossing of partially filled Landau levels in a Si quantum well, *Physical Review B* **79**, 241302(R) (2009)、査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.79.241302

[学会発表](計36件)

T. Sekihara, R. Masutomi, and T. Okamoto, Magnetic-field-independent superconductivity of ultrathin Pb films on cleaved GaAs surface, 20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (Chamonix, France), July 22-27, 2012.

R. Masutomi, N. Toriyama, T. Okamoto,

Low-Temperature Scanning Tunneling Microscopy and Transport Measurements on Adsorbate-Induced Two-Dimensional Electron Systems, 31th International Conference on the Physics of Semiconductors, (Zurich, Switzerland) July 29-August 3, 2012.

岡本 徹、半導体表面における量子ホール伝導と2次元スピングラス、日本物理学会秋季大会(富山大学)2011年9月21日 - 24日。

T. Okamoto, Magnetotransport in adsorbate-induced two-dimensional electron systems on cleaved InAs surfaces, The 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (Seoul, Korea), July 25-30, 2010.

R. Masutomi, K. Sasaki, I. Yasuda, A. Sekine, K. Sawano, Y. Shiraki, T. Okamoto, Cyclotron Resonance of Two Dimensional Electrons near the Metal-Insulator Transition, The 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (Seoul, Korea), July 25-30, 2010.

〔図書〕(計 1件)

J. Matsunami and T. Okamoto: Electrical Detection of Electron-Spin Resonance in Two-Dimensional Systems, Series: the Topic in Applied Physics, Vol. 115 (2009), Ed. Marco Fanciulli, pp. 129-140 (著書・分担執筆)。

〔その他〕

ホームページ等

<http://dolphin.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本 徹 (OKAMOTO, Tohru)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号：6 0 2 4 5 3 7 1

(3) 連携研究者

栞富 龍一 (MASUTOMI, Ryuichi)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：0 0 3 9 7 0 2 7