

平成 21 年 5 月 12 日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18340080
 研究課題名（和文） 半導体表面および界面の 2 次元系とスピンに関する研究
 研究課題名（英文） Spin degree of freedom in two dimensional systems
 formed at semiconductor surfaces and interfaces
 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：60245371

研究成果の概要：研究成果は多岐にわたるが代表的なものを 2 つ挙げる。(1)一原子層以下の Fe を吸着させた InAs 劈開表面において、2 次元電子の磁気抵抗曲線における明瞭なヒステリシスを観測した。さらに詳細な測定を行い、Fe の超薄膜が 2 次元スピングラスを形成していることを強く示唆する結果を得た。(2)強相関シリコン 2 次元電子系に対して希釈冷凍機中で磁場方位をその場制御した実験において、ランダウ交差時に擬スピンの強磁性ドメイン構造が形成されることを示す結果を得た。電気伝導の異方性は、面内磁場に直交する方向に伸びたストライプ構造を示唆する。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2006年度 | 6,100,000 | 1,830,000 | 7,930,000 |
| 2007年度 | 4,700,000 | 1,410,000 | 6,110,000 |
| 2008年度 | 4,000,000 | 1,200,000 | 5,200,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,800,000 | 4,440,000 | 19,240,000 |

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：(1) 低温物性、(2) 表面・界面物性、(3) 半導体物性、(4) 量子閉じ込め

1. 研究開始当初の背景

(1) 半導体劈開表面に形成された 2 次元系は、付着物質の自由度や走査プローブ技術の応用など今後の大きな発展が期待される系であるにも関わらず、肝心の面内伝導の測定に成功したのは、今日に至るまで研究代表者のグループのみである。研究開始の前年に、整数量子ホール効果の観測に成功している。

(2) 電子間(正孔間)相互作用の強い 2 次元系において観測される金属・絶縁体転移は、今日に至るまで未解決であり、半導体 2 次元

系物理の重要なテーマの一つとなっている。研究代表者らの研究を皮切りにスピンに着目した研究が盛んに行われるようになった。

2. 研究の目的

劈開表面 2 次元電子系およびヘテロ界面 2 次元電子系に対して、外部磁場により 2 次元電子および付着物質(劈開表面の場合)のスピンを系統的に制御した状態で、磁気抵抗効果および電磁波応答の測定を行い、電子状態を明らかにするとともに、新現象を探索することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 超高真空・液体ヘリウム温度領域で、試料劈開、蒸着、電気伝導測定、磁場方位制御ができる装置を開発し、磁性体をはじめとするさまざまな付着物質に対して表面2次元電子系の電気伝導測定を行った。

(2) 希釈冷凍機を用いて得られる50ミリケルビン程度の温度領域において、試料の温度を一定に保ったまま、磁場に対する方位を制御する機構を開発して、強相関シリコン2次元電子系における新しい電子状態を研究した。

(3) 1ケルビン前後の温度領域で試料にミリ波を照射することにより抵抗検出型の電子スピン共鳴を観測した。

(4) ホットエレクトロンにより、動的核スピンを制御した。

4. 研究成果

(1) 劈開表面2次元電子系

スピングラスに関して多くの計算が行われているが、2次元における有限温度でのスピングラス秩序の有無については決着がついていない。1原子層以下の磁性体の超薄膜は2次元スピングラスの舞台の有力な候補である。本研究において、Feを吸着させたInAs表面において2次元電子の磁気抵抗曲線における明瞭なヒステリシスが観測された。1原子層以下の吸着薄膜の磁気状態を2次元電子系の電気伝導を通じて観測した初めての研究成果である。ヒステリシスは、0.3~0.4原子層でのみ観測され、10K程度の温度で消失する。(a) 残留磁気抵抗効果の履歴による違い、(b) 磁場掃引後に見られる長時間緩和の対数的依存性、(c) 残留磁気抵抗効果の温度依存性、について系統的に調べた実験結果は、Fe超薄膜においてスピングラスが形成されていることを強く示唆する。

InAs劈開表面にアルカリ金属を蒸着した場合について、表面原子密度と2次元電子密度との関係を調べた。表面原子密度はイオンソースの積算電流から求め、2次元電子密度はホール係数から求めた。CsおよびNaの場合、低原子密度領域においては2次元電子密度は表面原子密度と比例して増加し、銀の場合の実験結果に対してこれまで我々が提唱したモデルとコンシステントな結果を得た。この増加は2次元電子のフェルミエネルギーが表面ドナー準位に達すると飽和する。飽和電子濃度から表面ドナー準位を導出するため、自己無撞着な計算を行った。表面ドナ

ー準位と原子のイオン化エネルギーとの関係は、これまで光電子分光から示唆されていた傾向と矛盾しないが、絶対値を比較すると今回の実験結果の方が表面ドナー準位は高い。光電子分光の先行研究においては、金属蒸着は室温において行われたためクラスター形成等の問題が生じたためだと思われる。孤立したアルカリ原子による表面ドナー準位の決定は、金属半導体界面研究の第一歩となりうるだろう。我々の手法の方が、高精度に表面ドナー準位を求めることができるので、今後、様々な物質に対して研究を拡張する必要がある。こうして得られた2次元電子系において、スピン軌道相互作用に起因するShubnikov-de Haas振動の強いbeatingが観測された。

InSbはInAsよりも有効質量がさらに小さく、量子ホール状態の実現にとって有利な条件をもっている。本研究において、表面処理方法の試行錯誤の末、銀およびセシウムを蒸着したInSb劈開表面において、面内電気伝導を測定することに成功した。2次元電子系の移動度は、InAsの場合よりも一桁程度高く、スピンギャップによる量子ホール状態を表面2次元系ではじめて観測した。また、AgおよびCsを蒸着したInSb劈開表面において、10ケルビンから100ケルビン程度の低温領域での熱処理によって表面電子濃度や移動度が大きく変化することが明らかになった。

(2) 強相関シリコン2次元電子系

磁場中で試料の角度を傾けることにより、サイクロトロンエネルギーとゼーマンエネルギーの比を変えて、軌道量子数 n とスピンの向きが異なる2つのランダウ準位を交差させることができる。それぞれの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、磁性の問題として取り扱うことができる。電子間相互作用が軌道量子数に依存するために擬スピン間の相互作用は異方的あり、通常の2次元電子系ではイジングライクな強磁性となると考えられている。高移動度Si/SiGeヘテロ構造中の2次元電子系に対して、ランダウ準位充填率 $\nu = 4$ において($n=1, \uparrow$)と($n=0, \downarrow$)の準位交差を行ったところ、非常に大きな抵抗ピークが観測された。これらの実験結果から、我々は、準位交差の過程で擬スピンの強磁性ドメイン構造が形成されていると考えた。異方性の起源については明らかではないが、実験結果は、面内磁場に直交する方向に伸びたストライプ状のドメイン構造を示唆している。

シリコンデバイス中のスピンは、量子計算やスピントロニクスなどの応用分野でも

注目されている。電子スピン共鳴はスピンを制御するための有効な手段であり、またその抵抗検出はデバイスの微細化のために不可欠である。シリコンは、長いスピン緩和時間が期待されることと集積回路技術の応用ができるため最も有望な母物質である。本研究において、電子スピン共鳴による抵抗変化の原因が電子加熱ではなく、共鳴によるスピン偏極率の減少によるものであることが実証された。また、強相関2次元系で観測される平行磁場下の正の磁気抵抗効果の原因がスピン偏極によるものであることが確認づけられた。さらに、共鳴吸収線幅から横緩和時間を導出するとともに、吸収の強さから縦緩和時間を導出することに成功した。平行磁場下での抵抗の大きさがスピン偏極率の優れたインジケータとなること、ミリ波照射による振動磁場の大きさがサイクロトロン共鳴吸収時の振動電場の大きさと比例関係にあることなどを巧みに利用した。得られた縦緩和時間はミリ秒のオーダーであったが、これまで半導体2次元系で報告されているものの中では最も長い。

(3) GaAs 電子系と核スピン

電子温度変化に伴い核スピン偏極が誘起されることを実証するため、ランダウ準位充填率 $\nu = 3$ の量子ホール効果ブレイクダウン領域において実験を行った。電流方向に対してチャンネル幅が段階的に変化する試料を用いた。電子の流れに対してチャンネル幅が広がる場合には、電子温度の低下に伴う down から up への電子スピン反転が起こり、狭くなる場合には電子温度の上昇による up から down への電子スピン反転が起こると予想されたが、実際、これらに対応する動的な核スピン偏極に相当する抵抗変化が観測された。半導体2次元系における電子スピン反転に伴う動的核スピン偏極は、これまで、分数量子ホール系のスピン偏極非偏極遷移を用いたものとエッジ状態間遷移を用いたものが1ケルビン以下の極低温領域において盛んに研究されていたが、電子温度の変化を利用したものは今回が初めてである。我々の手法は液体ヘリウム温度でも使えるので、応用上の利点も大きい。

磁場中において電流と直交した方向に熱流が流れる現象は Etingshausen 効果として知られている。奇数充填率 $\nu = 3$ の近傍において電流に直交した電子スピン流を検証し、かつ ν に対する依存性を明らかにするために実験を行った。電子スピン流がチャンネル端にぶつかることによるスピン反転が核スピン偏極を引き起こす。これによるエッジ・バルクトンネリング確率の変化を検出するため、特別にデザインした試料を作製した。電

流反転および磁場反転に対して電子スピン流の極性の反転が観測されたが、これはホール電場との関係が重要であることを示している。ホール電場に対する電子スピン流の極性は、 $\nu = 3$ を境に逆転した。このことは、散逸流を担う多数キャリアのスピンが電子スピン流の極性を決定していることを示唆する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 17 件)

Evidence for Two-Dimensional Spin-Glass Ordering in Submonolayer Fe Films on Cleaved InAs Surfaces, T. Mochizuki, R. Masutomi, and T. Okamoto, Physical Review Letters 101, 267204-1 - 267204-4 (2008) (査読有)。

Electric Transport Properties of the Ising Quantum Hall Ferromagnet in a Si Quantum Well, K. Toyama, T. Nishioka, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Okamoto, Physical Review Letters 101, 016805-1 - 016805-4 (2008) (査読有); (also selected by the Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology 18 (2), 2008)。

Alkali-metal-induced Fermi-level and two-dimensional electrons at cleaved InAs(110) surfaces, M. Minowa, R. Masutomi, T. Mochizuki, and T. Okamoto, Physical Review B 77, 23301-1 - 23301-3 (2008) (査読有)。

Hole density and strain dependencies of hole effective mass in compressively strained Ge channel structures, K. Sawano, Y. Kunishi, K. Toyama, T. Okamoto, N. Usami, K. Nakagawa, and Y. Shiraki, Physica E 40, 2122-2124 (2008) (査読有)。

Spin current in the quantum Hall regime detected by dynamic nuclear polarization, Y. Komori, S. Sakuma and T. Okamoto, Physica E 40, 1325-1327 (2008) (査読有)。

Quantum Hall effect at cleaved surfaces of InAs and InSb, R. Masutomi, T. Mochizuki, M. Hio, Y. Tsuji and T. Okamoto, Physica E 40, 1030-1033 (2008) (査読有)。

On Effects of Gate Bias on Hole Effective Mass and Mobility in Strained-Ge Channel Structures, K. Sawano, Y. Kunishi, Y. Satoh, K. Toyama, T. Okamoto, N. Usami, K. Nakagawa, and Y. Shiraki, Applied Physics Express 1, 011401-1 - 011401-3 (2008) (査読有) .

Ettingshausen Effect around a Landau Level Filling Factor $\nu = 3$ Studied by Dynamic Nuclear Polarization, Y. Komori, S. Sakuma and T. Okamoto, Physical Review Letters 99, 146807-1 - 146807-4 (2007) (査読有) ; (also selected by the Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology 16 (17), 2007).

Fabrication of Ge channels with extremely high compressive strain and their magnetotransport properties, K. Sawano, Y. Kunishi, K. Toyama, T. Okamoto, N. Usami, K. Nakagawa, and Y. Shiraki, Journal of Crystal Growth 301/302, 339-342 (2007) (査読有) .

Quantum Hall effect at cleaved InSb surfaces and low-temperature annealing effect, R. Masutomi, M. Hio, T. Mochizuki and T. Okamoto, Applied Physics Letters 90, 202104-1 - 202104-3 (2007) (査読有) .

Dynamic nuclear polarization induced by hot electrons, Y. Komori and T. Okamoto, Applied Physics Letters 90, 032102-1 - 032102-3 (2007) (査読有) .

Magnetotransport properties of Ge channels with extremely high compressive strain, K. Sawano, Y. Kunishi, Y. Shiraki, K. Toyama, T. Okamoto, N. Usami and K. Nakawaga, Applied Physics Letters 89, 162103-1 - 162103-3 (2006) (査読有) ; (also selected by the Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology 14 (18), 2006).

Electrically Detected Electron Spin Resonance in a High-Mobility Silicon Quantum Well, J. Matsunami, M. Ooya and T. Okamoto, Physical Review Letters 97, 066602-1 - 066602-4 (2006) (査読有) ; (also selected by the Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology 14 (8), 2006).

Observation of the quantum Hall effect in cleaved InAs surfaces, Y. Tsuji, T. Mochizuki and T. Okamoto, Physica E 34, 156-159 (2006) (査読有) .

Electron spin resonance of the two dimensional metallic state and the quantum Hall state in a Si/SiGe quantum well, J. Matsunami, M. Ooya and T. Okamoto, Physica E 34, 248-251 (2006) (査読有) .

Magnetoresistance in the strongly insulating regime of GaAs two dimensional hole systems, K. Toyama, M. Ooya and T. Okamoto, Y. Hashimoto, S. Katsumoto and Y. Iye, Physica E 34, 697-700 (2006) (査読有) .

半導体劈開表面の2次元電子系と量子ホール効果の観測, 岡本 徹、辻幸秀、望月敏光, 固体物理 34, 339-344 (2006) (依頼を受け執筆、査読有) .

[学会発表](計 30件)

R. Masutomi, M. Minowa, T. Mochizuki, and T. Okamoto: Alkali Metal Induced Two Dimensional Electron Systems at Cleaved Surface of InAs, The 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (Rio de Janeiro, Brazil), July 27-August 1, 2008.

T. Mochizuki, R. Masutomi, and T. Okamoto: Evidence for spin-glass ordering in submonolayer Fe films on InAs, The 29th International Conference on the Physics of Semiconductors (Rio de Janeiro, Brazil), July 27-August 1, 2008.

Y. Komori, S. Sakuma, and T. Okamoto: Spin current in the quantum Hall regime detected by dynamic nuclear polarization, The 17th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Genova, Italy), July 15-20, 2007.

R. Masutomi, T. Mochizuki, M. Hio, Y. Tsuji, and T. Okamoto: Quantum Hall effect at cleaved surfaces of InAs and InSb, The 17th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (Genova, Italy), July 15-20, 2007.

T. Mochizuki, Y. Tsuji, M. Hio and T. Okamoto: Magnetotransport of two-dimensional electrons at in situ cleaved InAs surfaces, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (Vienna, Austria), July 24-28, 2006.

J. Matsunami, M. Ooya and T. Okamoto: Electron spin manipulation, detection, and relaxation in a high mobility silicon quantum well, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (Vienna, Austria), July 24-28, 2006.

〔図書〕(計 1件)

Junya Matsunami and Tohru Okamoto: Electrical Detection of Electron-Spin Resonance in Two-Dimensional Systems, in "Electron Spin Resonance and Related Phenomena in Low-Dimensional Structures", Series: the Topic in Applied Physics, Vol. 115, Ed. Marco Fanciulli, in press.

〔その他〕

ホームページ

<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:60245371

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし