

平成 21 年 5 月 14 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007 ～ 2008
 課題番号：19540330
 研究課題名（和文） 量子ホール効果で調べる 2 次元電子系の電子相ドメイン構造とポテンシャルゆらぎ
 研究課題名（英文） Potential fluctuation and the domain structure of electronic state in two-dimensional electron systems investigated by the quantum Hall effect
 研究代表者
 氏名（ローマ字）：音 賢一（OTO KENICHI）
 所属機関・部局・職：千葉大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号：30263198

研究成果の概要： GaAs/AlGaAs 量子井戸 2 次元電子系を対象に低温・強磁場の下で微弱励起光による磁気光カー回転を用いて 2 次元電子系 1 層の電子スピン偏極度のイメージングを行った。試料の 0.1% 以下の僅かな電子濃度の空間ゆらぎにより、スピン偏極度が分布を持つことが明瞭に可視化された。また、電流によるホール効果で生じた極めて僅かな電子分布の変化がスピン偏極度に反映し量子ホール電流のイメージングが可能であることを実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 19 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
平成 20 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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： 量子ホール効果、ポテンシャル揺らぎ、2 次元電子系、電子スピン分極、電流分布、Kerr 効果、イメージング

1. 研究開始当初の背景

GaAs/AlGaAs ヘテロ接合などの 2 次元電子系の低温・強磁場における量子ホール効果では、ランダウ量子化により非圧縮性電子状態となりポテンシャル遮蔽の消失や電子相関による様々な多体効果が顕著に現れる。特に、近年量子ホール状態の電子スピンの関与する核スピン偏極や大きな抵抗増大、多数電子スピンの関わるスカーミオン励起などが注目され、スピンの制御・検出・初期化が可能な系として研究されている。

量子ホール系の電子スピン偏極度は、近年の研究で単にランダウ準位の占有数で決定

してしまうものではなく、スカーミオン等の励起によるスピン緩和、電流による電子励起、2 次元電子系のポテンシャル揺らぎによる局所占有数の変動など、いずれも空間分布を伴ったり局所的・時間的に変動するダイナミックなスピン励起・緩和に大きく左右されているものと考えられる。本研究ではこれらの空間分布を直接観測し、その詳細を探る新しい試みである。

量子ホール系は元来「巨視的に現れる量子効果」であるため、例えば試料内の電流分布によらず、正確な量子化ホール抵抗が観測される。しかし、実際には電流分布や局所的な

占有数のゆらぎが量子ホール系の伝導を左右しており、空間分解された計測がそのメカニズムの解明に重要な役割を果たすことが強く認識されるようになった。しかし、量子ホール2次元電子系のスピン偏極度の直接観測は実験的に困難であり、さらにその空間分布についての研究はほとんど報告されておらず詳細な実験が待ち望まれていた。

2. 研究の目的

我々のグループでは、これまで量子ホール効果の非局所伝導、キャパシタンスによるエッジ状態の空間分布計測、ポッケルス効果による電位分布、などの手法で量子ホール電子系の伝導機構を調べてきた。また、Kerr効果を利用した1層の2次元電子系の電子スピン偏極を極めて高感度に計測する手法を確立した。本研究ではこのKerr効果によるスピン検知法と、ポッケルス電位分布イメージングで培ったイメージング法を組み合わせ、「量子ホール電子スピン偏極イメージング」を実現する。これにより、量子ホール状態にある電子のスピン偏極状態の分布やドメイン構造の直接観測、その動的変化などを捉えることを目指す。

また、量子ホール状態では電子によるポテンシャルの遮蔽効果が著しく抑制されるため、図1のように、ゼロ磁場中では表に出てこないポテンシャルゆらぎの空間分布が電子スピン偏極度のドメイン構造に強く影響し整数・分数量子ホール効果における電気伝導の性質を左右しているものと考えられる。本研究はこれをさらに発展させて、ポテンシャル揺らぎによるドメイン構造の空間分布・エネルギースケールを調べることも試みる。

3. 研究の方法

(1) Kerr効果による量子ホール2次元電子系のスピン偏極度イメージング測定系の構築

低温・強磁場下でのGaAs/AlGaAs 2次元電子系(単層量子井戸)における量子ホール状態の電子スピン偏極による極微小Kerr回転角を共鳴励起直近のスポット励起光と偏光

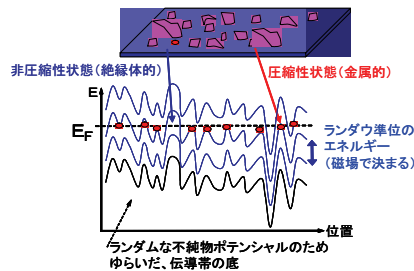


図1：量子ホール状態の2次元電子系がポテンシャルゆらぎによりドメイン構造を示す。

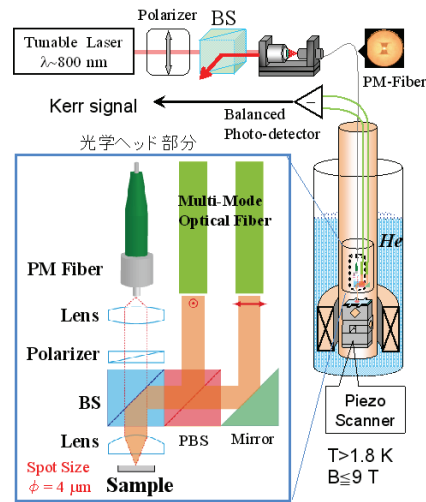


図2：Kerr効果による量子ホール電子系のスピン偏極イメージング測定系の構成図。

アームを用いたホモダイン検波によって、高感度検出を行う(図2参照)。この励起光スポットを試料上で走査することで、電子スピン偏極度のイメージングが可能である。この測定系は既存の伝導計測用の光学窓を持たない超伝導電磁石にそのままトップロードで挿入できるものとする。Kerr効果の計測では、自家製の外部共振器型波長可変半導体レーザーを光源とし偏波保存光ファイバーにより試料表面へと励起光を照射し、反射光を試料直上においてバランス型ホモダイン検波を行う。また、試料のゲート変調電圧によるロックイン検出も併用して高感度・高安定度を得る。試料は、 ^4He ガス雰囲気中であり4.2K~1.8Kの温度で動作可能なものとする。さらに、励起光スポットをできるだけ絞ることができるよう光学系ヘッド部分の試作・改良により空間分解能の向上を目指す。本研究では、構築したこの測定系を用いて以下の項目を調べる。

(2) 量子ホール電子系のスピン偏極度の空間分布

ランダウ準位占有数が奇数の量子ホール状態ではスピン偏極度が大きい、現実には2次元電子系の僅かなポテンシャルゆらぎ(電子濃度のゆらぎ)を反映してスピン偏極度も空間分布をもつものと考えられる。さらに、奇数占有数からずれると偏極度が減少するが、これにはスカーミオン励起など多体電子系特有の空間分布をもつスピン励起が関与する場合もある。これらの様子を偏極度イメージングで直接観察することを試みる。

また、量子ホール効果での電流は「どこをどのように」流れているかは様々な条件ごとに異なり電流量により動的にすら変化する。電流密度の高い部分は局所的に励起

電子が多くなっており、スピン偏極度の変化として捉えられる可能性がある。GaAs 試料の性質や電流量により、電流の空間分布がどのように変化するかを系統的に調べる。

(3) 量子ホール・ブレイクダウン電流による動的核スピン偏極効果と電子スピン状態

量子ホール効果のブレイクダウンが生じる電流が流れているとき、励起されたスピン偏極電子が緩和する際に局所的に原子核スピンを偏極することが報告されている。すなわち、ブレイクダウン電流の分布に沿って動的核スピン偏極が生じ、それにより電子スピン偏極が変化するものと考えられる。これを検証しブレイクダウン電流の流れをそのまま可視化することを試みる。また、ブレイクダウン電流の空間分布について様々な試料構造で調べ、電子濃度ゆらぎの大きさや空間分布などとの相関を(2)での実験結果と併せて検討するとともに、ブレイクダウン臨界電流付近で観測される電流-電圧特性の時間的な不安定性と、スピン偏極のドメイン構造のゆっくりした時間的変動との相関を調べ、量子ホール効果のブレイクダウンの機構についての知見を得る。

(4) スピンイメージングによる2次元電子系の均一度の評価への応用

以上の実験結果を基に、GaAs/AlGaAs 2次元電子系試料のポテンシャル揺らぎの程度(エネルギースケールおよび空間分布)を評価する新しい方法として、量子ホール効果でのスピン偏極度イメージングを応用することを試みる。

4. 研究成果

(1) 量子ホール電子スピンイメージング測定系の開発と電流の可視化

本研究では GaAs/AlGaAs 量子井戸 2次元電子系を対象に、低温・強磁場の下で微弱励起光による Kerr 回転を用いて2次元電子系1層の電子スピン偏極について高感度・高分解能で検出できる測定系(図2)を開発・製作しイメージングを行った。特に、光学窓を必要としないトップロード型で光ファイバーによる励起および検出法を踏襲しつつ、励起光スポットのサイズを絞りフォーカス点を正確に検知可能に改良し、空間分解能は4ミクロン程度にまで向上した。

(2) 試料の電子濃度揺らぎの高感度検出とその空間分布のイメージング

試料に外部電流を流さない状態では、試料の電子濃度の空間分布に応じて局所スピン偏極度が分布を示す。温度 4.2 K、占有数 $\nu = 1$ における試料中のスピン偏極イメージング(図3)では、試料内の 0.1%以下

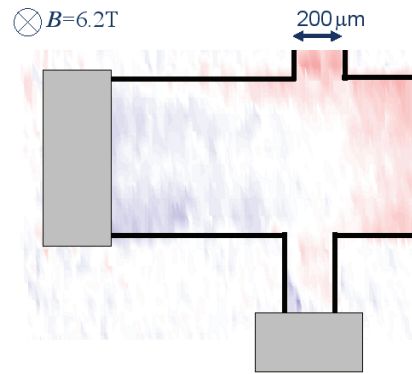


図3: $\nu=1$ 量子ホール状態の2次元電子系のスピン偏極度で見たポテンシャルゆらぎによる電子濃度の局所変動。図中の赤(青)い部分は電子濃度が僅かに少ない(多い)部分である。

の僅かな電子濃度ゆらぎが明瞭に可視化され、この方法により半導体2次元電子系の均一度を数ミクロンの分解能で鋭敏に評価が可能であることを示した。

(3) スピン偏極度のイメージングによる量子ホール電流の可視化

さらに、試料に電流を流すことでホール効果によるポテンシャル分布が生じ、これにより生じた極めて僅かな電子分布の変化がスピン偏極度に反映しイメージングが可能であることを示した。図4のイメージは占有数 $\nu = 1$ の量子ホール強磁性状態におけるスピン偏極度のマッピングで、高々2マイクロ

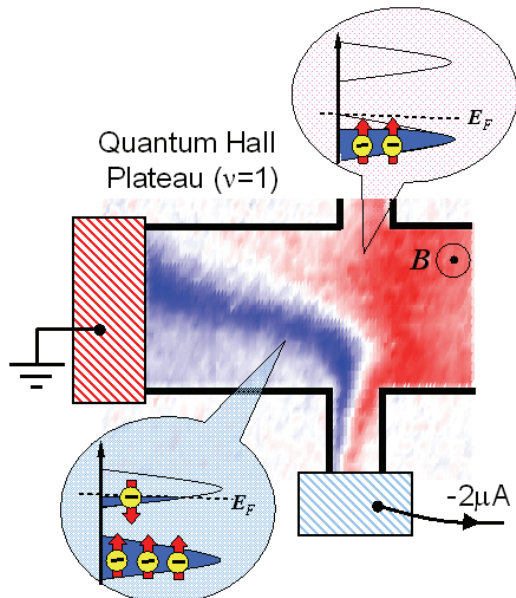


図4: $\nu=1$ 量子ホール状態で電流を流した時のスピン偏極度の分布。電極間をつなぐ白い帯状の領域は丁度 $\nu=1$ の部分で、その両側にホール効果により僅かに電子濃度に変化している部分が広がっている様子が捉えられている。

アンペアの電流により、2次元電子系のスピン偏極度の空間分布が無電流時から比べて顕著に変化し、定性的には電流の有無により大きく変化する部分に集中して量子ホール電流が流れているものと考えられる。これは、電流分布の情報が電子スピン偏極度を通して可視化されていることを意味しており、これまで実験的に困難であった核スピン偏極による動的な電子スピン偏極度の変化や電流分布への影響の研究に、このスピニングが有力な手法となることを示した。

なお、本イメージングシステムがトップロード型で、光学系もコンパクトで可搬なサイズである特徴を活かして、平成21年度には東北大学金属材料研究所の共同利用マグネットを用いてさらに強磁場での実験を行う予定である。

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 13 件)

- ① Electron spin imaging in quantum Hall devices by Kerr rotation measurement, K. Oto, R. Inaba, T. Yamada, T. Yamazaki, K. Muro, Y. Hirayama, N. Kumada, and H. Yamaguchi, 査読有, Int. J. of Modern Phys. B, (in press).
- ② Transport properties and observation of quantum Hall effects of $\text{InAs}_{0.1}\text{Sb}_{0.9}$ thin layers sandwiched between $\text{Al}_{0.1}\text{In}_{0.9}\text{Sb}$ layers, I. Shibasaki, H. Geka, S. Ishida, K. Oto, T. Ishihara, and T. Yoshida, 査読有, Microelectronics Journal, **40**, 592-594 (2009).
- ③ Spin dynamics of two-dimensional electrons in a quantum Hall system probed by time-resolved Kerr rotation spectroscopy, D. Fukuoka, T. Yamazaki, N. Tanaka, K. Oto, K. Muro, Y. Hirayama, N. Kumada, and H. Yamaguchi, 査読有, Phys. Rev. B **78**, 041304(R) 1-4 (2008).
- ④ Potential imaging in quantum Hall device by optical fiber based Pockels measurement, M. Dohi, R. Yonamine, K. Oto, and K. Muro, 査読有, Int. J. of Modern Phys. B **21** (2007) 1414-1418.

[学会発表] (計 26 件)

- ① 山田哲也、電子スピン分極イメージングによる量子ホールデバイス中の電流分布測定、日本物理学会第 64 回年次大会、3. 28 (2009) 立教大学 池袋キャンパス (東京都)
- ② K. Oto, Electron spin imaging in current flowing quantum Hall devices, 13th

Advanced Heterostructures and Nanostructures Workshop, Dec. 10th (2008), Big Island of Hawaii, USA.

- ③ 音賢一、量子ホール 2 次元電子系のスピンイメージング、6 特定領域合同研究会「スピンが開く物性科学の最前線」11. 29 (2008) 東京大学武田ホール(東京都)
- ④ K. Oto, Electron spin imaging in quantum Hall devices by Kerr rotation measurement, 18th Int. Conf. on High Magnetic Fields in Semicond. Phys., Aug. 6th (2008), Sao Paulo, Brazil
- ⑤ K. Oto, Optical Imaging of Quantum Hall Current in GaAs/AlGaAs Two Dimensional Electron System, 29th Int. Conf. Phys. of Semiconductors (ICPS 2008), 29th July (2008), Rio de Janeiro, Brazil.
- ⑥ 金子志行、電気光学イメージングでみた量子ホールブレイクダウン、日本物理学会第 63 回年次大会、3. 23 (2008) 近畿大学本部キャンパス
- ⑦ K. Oto, Imaging of Quantum Hall Current in High Magnetic field, 4th International Symposium on High Magnetic Field Spin Science in 100T, 11. 27 (2007), Tohoku University, Sendai, Japan
- ⑧ K. Oto, Imaging of Quantum Hall Current in GaAs/AlGaAs Two-dimensional Electron System, 5th International Workshop "Quantum Transport in Nanoscale Devices" 10. 20 (2007) Chiba University, Chiba, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

音 賢一 (OTO KENICHI)

千葉大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：30263198

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

研究協力者

室 清文 (MURO KIYOFUMI)

千葉大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90112028