

極低温・強磁場下における分数量子ホール2次元電子のスピンの偏極イメージング Electron Spin Imaging in 2D-Electron System in Quantum Hall Regime

千葉大・理 音 賢一, 山田 哲也, 松田 貴治, 室 清文
 東北大・金研 西 崙 照和, 小林 典男
 K. Oto¹, T. Yamada¹, T. Matsuda¹, K. Muro¹, T. Nishizaki², N. Kobayashi²
¹ Faculty of Science, Chiba University
² Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

低温強磁場における高易動度 GaAs/AlGaAs 2次元電子系は量子ホール効果をはじめとする顕著な量子効果が現れるとともに電子スピンおよび核スピンに関連した空間分布を伴う様々な物理現象の舞台となっている。整数量子ホール状態の2次元電子系のスピン偏極状態は、基本的にはゼーマン分裂したランダウ準位の上下スピンの電子数差により決まるが、実際にはイオン化不純物による2次元電子系のポテンシャルの乱れや電流によるホールポテンシャルなどの影響を受けて局所的なランダウ準位の占有数が場所により異なるため、試料内部でスピン偏極状態は空間分布を示す。また、核スピン偏極による有効ゼーマンエネルギーや、スピン緩和を促すスカーミオン励起などの影響も受けて多様な空間パターンを示し、それらは量子ホール効果での電気伝導に大きな影響を与えているものと考えられる。本研究では量子ホール状態での電子スピンの空間分布やそのダイナミクスについて調べるため、低温・強磁場中での光磁気カー回転計測によるイメージング計測系とその要素技術の開発を行い、量子ホール2次元電子系のスピンの空間分布や電流分布について詳しく調べることを目指している。

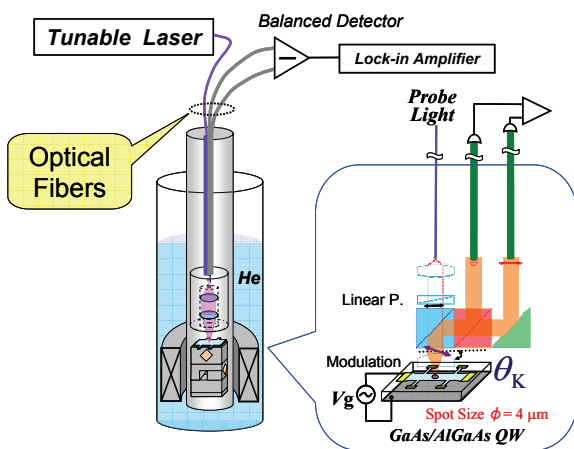


Fig. 1 Optical Fiber-based scanning Kerr microscope.

2. 極低温・強磁場で動作する可搬な走査型 Kerr 顕微鏡の開発

高易動度 GaAs/AlGaAs 量子井戸2次元電子系を対象に、光磁気 Kerr 効果を用いて2次元電子系1層の電子スピン偏極について高感度・高分解能で検出し、その空間分布を測定できるシステム (Fig.1)を開発した。微弱な Kerr 信号の検出では、励起光に GaAs の吸収端近傍の波長を用いるとともに、試料ゲートによる電子濃度変調に同期したカー信号成分をロックイン検波する事で高感度を得ている。また、このイメージングシステムは、強磁場施設に容易に持ち込むことができるように、試料ホルダーは分解可能なトップロードタイプのものを製作した。また、光の導入には偏波保存光ファイバーで励起光を試料まで導き、光学窓の無い一般的なソレノイド電磁石での使用を可能にしている。光源には外部共振器型の波長可変レーザーを自作し、60cm 角の光学ベンチ上に光源から光学素子まで実験に必要なものをすべて搭載している (Fig.2)。試料は微動ステージに載っており、光照射スポットを走査することで Kerr 効果によるスピン偏極度のマッピングを得る。

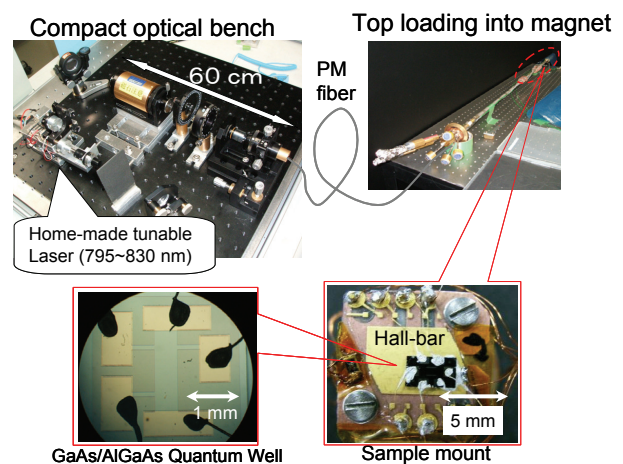


Fig. 2 Optics and sample holder. The Hall-bar shaped sample is mounted on the scanning stage.

3. 量子ホール状態のスピンの偏極分布と量子ホール電流の可視化

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の偏極が分布を持つ。Fig.3は温度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である。白い帯状の部分是最も偏極度の大きい部分で、占有数が丁度 $\nu=1$ の部分である。その上下では偏極度が下がっておりこれは、試料内のわずか0.1%以下の電子濃度ゆらぎが明瞭に可視化され、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ている。

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。Fig.4は電流を流しているときの占有数 $\nu=1$ におけるスピン偏極度のマッピングで、高々2マイクロ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、電流分布の情報が電子スピン偏極度を通して計測できることを示した。

また、電子相関が極めて顕在化する分数量子ホール効果での電子スピンの示す様々な状態、すなわち量子ホール強磁性状態、スカーミオン励起、スピン・ドメイン構造などの実空間分布を研究するため、東北大学金属材料研究所の強磁場マグネットの共同利用による実験を行った。製作した Kerr 効果顕微鏡を搬入し、まず予備実験として15T 超伝導磁石を用いて実験を行った。光ファイバーの切断や、移動後の光学系の調整に時間がかかった事による問題があったため、実験手順の見直しと試料ホルダーの無調整化などの工夫を行い、平成22年度には分数量子ホール領域での強磁場実験を行うためハイブリッドマグネットの利用による実験を準備している。

謝辞： 本研究は科研費特定領域研究「100テスラ領域の強磁場スピン科学」(No.451)の援助を受けて実施された。また、高移動度 GaAs 量子井戸試料は東北大学 平山祥郎 教授ならびに NTT 物性科学基礎研究所 熊田倫雄 博士より提供されたものである。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

[1] "Electron spin imaging in quantum Hall devices by Kerr rotation measurement", K. Oto, et al., Int. J. of Modern Phys. B, **23**, 2750-2754 (2009).

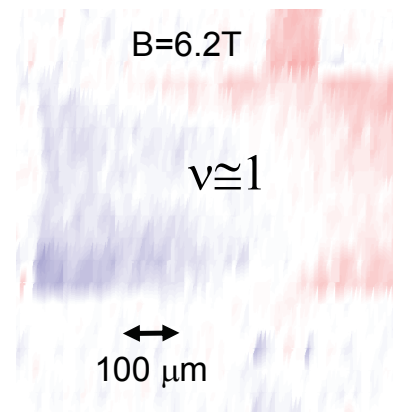


Fig. 3 Spin polarization images at $\nu=1$ quantum Hall plateau measured at 4.2 K. A faint contrast measured without current flow is due to the electron density variation less than a few %.

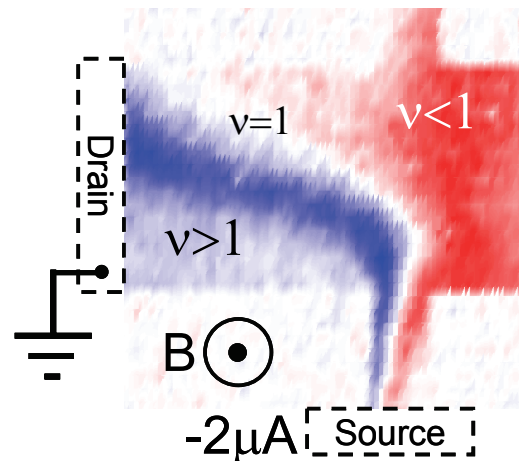


Fig. 4 Spin polarization images measured with external current of $-2 \mu\text{A}$. The observed Kerr signal $d\theta_K/dV_g$ is negative ($\nu>1$) at the lower left side of the sample, where the electrons are injected from the source electrode.