

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654083

研究課題名(和文)量子ホール電子スピンイメージングによる半導体ポテンシャルゆらぎの高感度あぶり出し

研究課題名(英文) Sensitive detection of potential fluctuations in semiconductor two-dimensional electron system by spin polarization imaging technique

研究代表者

音 賢一 (Oto, Kenichi)

千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30263198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：半導体2次元電子系を低温・磁場下で量子ホール状態にしてポテンシャル遮蔽効果が効かないときの電子スピンの偏極度が、局所的な電子状態を極めて鋭敏に反映することを用いて、電子濃度の僅かな局所的ゆらぎとその空間分布について光磁気カー効果を用いた電子スピン偏極度の高感度計測とそのイメージングにより調べ、高品質な2次元電子系半導体を対象に遮蔽効果のベールを引き剥がした真の半導体評価法としての定性的・定量的能力を探った。本研究の手法により0.1%以下の僅かな電子濃度ゆらぎや、量子井戸の1原子層の厚みゆらぎが検知可能であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：We tried to evaluate the electron density fluctuation and the spatial profile in high quality two-dimensional electron systems by means of the magneto-optical Kerr effect at quantum Hall plateau condition. At the quantum Hall plateau, the bare potential fluctuation appears due to the absence of potential screening by electrons. The observation of electron spin polarization at quantum Hall plateau by the Kerr effect microscope is very sensitive to the local electron density, which reveals the true potential fluctuations less than 0.1%. We also confirmed that the mono-atomic layer thickness fluctuation in quantum well can be detected by the magneto-optical Kerr effect (circular dichroic absorption) and is able to map with the electron density fluctuation.

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：半導体 メゾスコピック スピンエレクトロニクス 量子ホール効果 2次元電子系 電子濃度揺らぎ
量子井戸

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究課題は、最近の高品質な半導体ヘテロ接合の2次元電子系における電子濃度のゆらぎの程度など、これまで行われてきた電気伝導評価法では得られない情報を、低温・強磁場下の現象である量子ホール効果を利用して測定する新しい手法の確立を目指すものである。この研究の着想は、基盤研究C「新しいタイプの量子ホール効果のブレークダウンのメカニズム」(平成15～16年度、研究代表者：音賢一)の遂行中に、量子ホール状態の電気伝導と2次元電子系の不均一性(電子濃度のゆらぎの程度とその空間分布)が強い相関を持っていることを示す結果を得たことによる。量子ホール状態にある2次元電子系は、強磁場により電子はランダウ準位を形成しエネルギーが離散的になる。このとき、電子によるスクリーニング(遮蔽)効果が著しく抑制されることにより、通常の評価で用いられる電子移動度などには遮蔽されて表れない「電子濃度の揺らぎ」がそのまま電気伝導特性に影響を及ぼす。特に、量子ホールプラトー状態における圧縮性電子状態は、電子濃度の不均一から生じ、その空間分布がそのまま電子濃度の揺らぎの空間スケールを与えるものとなる。この電子状態は、2次元電子系の電子スピンの分極度に鋭敏に反映し、光磁気効果である Kerr 効果を通じて「見る」ことができる。本研究では、量子ホール状態の電子スピン分極のイメージング計測から電子濃度の揺らぎのエネルギースケールおよび空間分布を調べ、遮蔽効果のベールを引き剥がした真の半導体評価法とすることを試みるものである。

2. 研究の目的

近年の著しい半導体技術の進展で、GaAs/AlGaAs 半導体ヘテロ接合などに代表される2次元電子系は非常に高品質のものが作製されている。しかし、これらの品質評価の際に、通常用いられている電子移動度の大小で

は「電子濃度の不均一性」など高品質結晶の「質」を表す重要なパラメータは判断できない。デバイスの超集積化に伴いナノメートルのオーダーの極微化が進んでいる中で、電子濃度の局所分布のマイクロ・スコピックな評価は今後ますます重要な意味を持つと考えられるが、その評価のための実験手段はこれまでほとんど無かった。本研究では、低温・強磁場下の2次元電子系における量子ホール効果を利用して2次元電子系の電子濃度の不均一性に関する情報、すなわち、電子濃度の局所的ゆらぎの程度とその空間分布について定量的に計測する新しい方法を提案し、高品質な2次元電子系の質の判断に結びつく新しい評価手段としての可能性を見出すことを目標とした。

3. 研究の方法

本研究は、半導体2次元電子系を低温・磁場下で量子ホール状態として、そのときの電子スピン分極状態を光学的に精査しマッピングすることで、通常用いられる電子濃度、電子移動度などの特性値には表れない「極わずかな電子濃度の揺らぎの程度」と「その空間分布」の計測を行う。従来の半導体評価法では伝導電子そのものによる遮蔽効果のためデバイスを作製するまではこのような乱れの有無すら検知できないが、本研究はこの隠された乱れを量子ホール効果であぶり出すという斬新なアイデアを基にして、半導体の真の品質の評価法としての可能性を調べることを目的として実験的検討を行った。

(1) 電子濃度のゆらぎの程度と分布の計測に対する、本方法の定量性の実証

光磁気 Kerr 効果を用いた電子スピン偏極の高感度計測とそのイメージング法による空間分布計測を行うことで、非接触・低侵襲な新しい半導体評価法としての特性および再現性を調べ定量的評価法としての可能性を調べる。事前の予備実験で、数ミリメートル

ル四方の半導体 2 次元電子系内の 1 % 以下の電子濃度のゆらぎの分布を空間分解能 5 ミクロン程度で計測が可能であることを示した。本研究開発では、さらに装置の改良を行い、0.1% 以下の極わずかな電子濃度ゆらぎについて空間分解能 1 ミクロン程度での再現性の良い計測が可能であることを示す。

(2) 電子濃度ゆらぎの検出感度の更なる向上と高い再現性の確保（装置安定度の向上）
 現有の Kerr 効果による電子スピン偏極度のイメージング装置をさらに高感度化するとともに時間的安定度を高めるべく改良を行う。具体的には光学系の小型化・高剛性化による振動や温度ドリフトからの影響を避けること、および $1/f$ ノイズを避けるために信号を高周波ロックイン検出法により行えるように改良する。また、できるだけ空間分解能を向上するための高 NA のレンズを生かす光ヘッド部分の設計試作も併せて行う。

4. 研究成果

(1) 直線偏光のレーザー光が電子スピンの磁化により受ける磁気光学 Kerr 効果を用いた走査型 Kerr 顕微鏡を製作し（図 1）、主にランダウ準位占有数 $\nu=1$ の電子スピン分極率のイメージング測定を行った。測定は液体ヘリウム温度 ($T=4.2\text{ K}$) で行ったが、高感度化の試み（後述）の際には、温度 1 K 以下での実験を行うため、希釈冷凍機にも計測系を設置して 0.2 K 程度での測定も実施した。これを用いて、
)弱励起光による量子ホール状態のスピン偏極の計測、
)光学ヘッド部分の最適化による位置分解能の向上、
)再現性の向上、
)について取り組んだ。

また、電子スピンイメージングを行う際に、Kerr 効果の励起波長依存性や磁場依存性を組み合わせて行うことで、量子井戸の厚みのゆらぎや局所的な電子濃度の揺らぎなど、電子スピンイメージングの結果を定量的に解析することにも成功した。

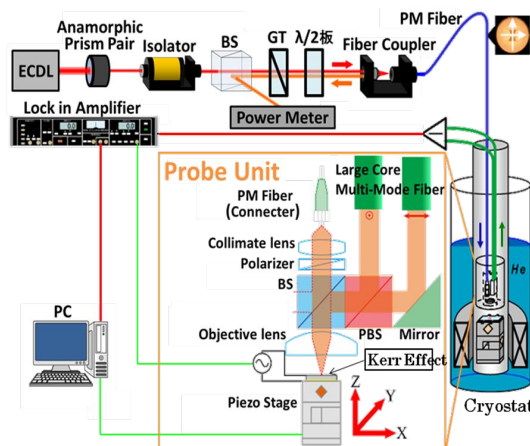


図 1：製作した走査型 Kerr 顕微鏡

ランダウ準位の占有数が奇数、特に $\nu=1$ での電子スピン分極率は $\nu=1$ で最大値となり、その後では著しく減少する。本研究の Kerr 効果の計測では、電子濃度をゲートにより変調してロックイン検出により微分信号を取得するため、極僅かな電子濃度の増減を鋭敏に検出することができる。図 2 は長さ 1 mm、幅 0.5 mm のホールバー形状にした量子井戸 2 次元電子系の Kerr 効果のイメージングで、赤色、青色は $\nu=1$ からのずれ、すなわち電子濃度の局所的な増減を表わす画像に相当する。あらかじめ計測した Kerr 効果の磁場依存性の結果から、図 2 の左上部の赤色の領域と右下部の青色の領域では、最大で電子濃度が 2.8% 程度の増減に相当することが分かった。

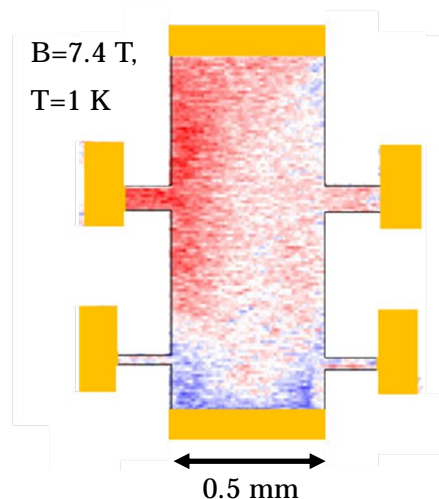


図 2： $\nu=1$ での電子スピンイメージング
 局所電子濃度は 青 < 白 ($\nu=1$) < 赤

また、測定されたKerr効果の信号のS/N比を検討したところ、0.1%程度の電子濃度の増減も検出可能であることを実証した。

この局所的な電子濃度ゆらぎの原因として、ドナーの濃度分布（面内・厚み方向）や電極からの距離などが考えられる。また、量子井戸2次元電子系の場合では電子の存在する量子井戸層の厚みのゆらぎも影響する可能性がある。本研究では、電子スピンによる磁化成分をKerr効果により高感度検出しているが、測定に用いる励起光の波長依存性や磁場依存性を調べて円二色性吸収による大きなKerr回転角を検出することで、量子井戸層のエネルギー準位、すなわち、量子井戸の厚みゆらぎも鋭敏に検出できることを示した。図3は図2の試料中にある黒点で示した場所でKerr効果の励起波長依存性を調べることで推定した局所的な量子井戸厚みのゆらぎである。試料中央での量子井戸厚を設計値の17nmと仮定して基準とし、各点での井戸厚の違いを可視化したものである。図の左上付近が井戸厚が厚く、右側が比較的薄いことがわかる。ただしこの違いは±0.6nm程度であり、GaAsの格子定数より、原子層1層程度の増・減である。

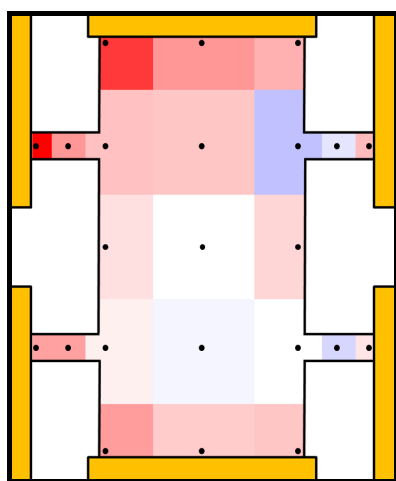


図3：円二色性吸収の波長・磁場値より求めた量子井戸のエネルギー準位を井戸層の厚みのゆらぎとして表わしたもの。赤・青はGaAs井戸の厚い・薄い部分を示す。

(2) 電子濃度ゆらぎの検出感度の向上を目指し、図1のKerr効果検出法の他にSagnac光干渉計を用いたKerr回転測定系を構築した。この方法では、単一モード偏波保存光ファイバー1本で、光照射と検出を行うとともに、高感度の特徴を生かして低励起光強度での実験が可能になるなど、低温下での計測にも有利であると考えた。また、Kerr回転の検出にあたり、少しでも検出感度を上げるため、量子井戸試料では共鳴吸収の生じないぎりぎりの波長にして、さらに試料の電子濃度変調を行っているが、通常最も多用されるGaAs-HEMT構造の2次元電子系では、価電子帯に明瞭な準位が無く、一般的にはバックゲートも無いため、感度向上のための方策がほとんど無く、高感度な検出系が本質的に不可欠である。本研究では、HEMT構造の試料でのKerr回転計測を行うべく、Sagnac光干渉計による計測を試みた。図4はGaAs試料で測定したKerr効果の励起波長依存性である。2次元電子スピンの磁化によるKerr回転は余りに微小なため、現状ではノイズに埋もれて計測には至っていない。一方で、励起波長の変化に追従する円二色性吸収による信号を捉えることには成功しており、Kerr回転の現れている磁場値とその時の励起光エネルギーをプロットしたものが図5である。ランダウ準位($E_N = (N+1/2)\hbar\omega_c$)の指数 $N = 2, 3, 5$ における信号が観測されていることがわかる。円二色性の吸収信号からもスピン分離したランダウ準位の局所的な占有数についての情報が得られることから、本研究の手法によりHEMT構造の2次元電子系についても電子濃度ゆらぎなどのイメージングが可能であると考えられる。ただし、量子井戸試料に比べて信号強度が極めて弱いので、電子濃度変調や磁場変調などを導入するなど、さらなる高感度化を進めることで信号のS/Nを稼ぎ、測定の精度（電子濃度の違いの感度）を向上させる必要がある。

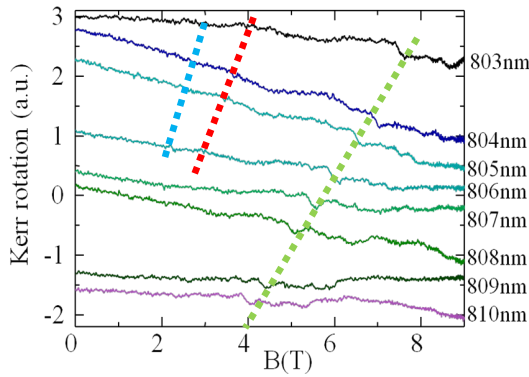


図4：Sagnac 干渉計を用いた Kerr 回転測定系による HEMT 試料の円二色性吸収信号

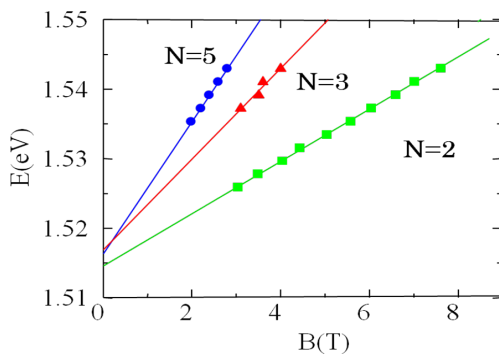


図5：図4の HEMT 試料の円二色性吸収の磁場位置と励起光エネルギー。Nは該当するランダウ指数

さらに、高い空間分解能と良好な再現性を得るために、試料直上の光学ヘッド部分について、使用レンズや光ファイバーのNAのマッチングなどの最適化と、ヘッド部分の小型・高剛性化による、信号光強度の増加と位置分解能の向上を行った。特に光ヘッド部分の小型化は、測定の長時間安定性に貢献し、1ミリ角程度の大きなサイズのイメージングに必要な90分程度のスキャンにおける安定性が向上した。

位置分解能は、使用している光波長と対物レンズのNAにより、概ね4 μm 程度になる。実際、試料上の金属電極との境界でナイフエッジ法で計測した励起光スポットの半値幅も4 μm と一致しており、極低温・強磁場下でも光学系は正常に動作しているものと考え

えられる。励起光スポットにおける光のうち、実際に試料から得られる Kerr 信号に寄与するのは、ほぼスポット中心付近の光が主となるため、図6のように、試料端に沿った約1 μm 程度の幅を持つと思われる細い部分からの Kerr 信号も分離して計測されている。(図6の1ピクセルは2.5 μm)

本研究では、2次元電子系の局所的な電子濃度のゆらぎ、量子井戸の厚みの揺らぎ、についてKerr効果の波長依存性(量子井戸の共鳴による円二色性吸収)および磁場依存性(ランダウ準位の占有率)の情報を合わせることで、両者の影響を分離して計測できることを明らかにした。また、Kerr効果のイメージングの高感度化を図るため、希釈冷凍機とKerr顕微鏡を組み合わせた測定装置を試作したり、Sagnac干渉計を用いた系を製作した。これを用いて、量子井戸試料だけでなく、HEMT構造の2次元電子系にも本手法の適応範囲を広げた。

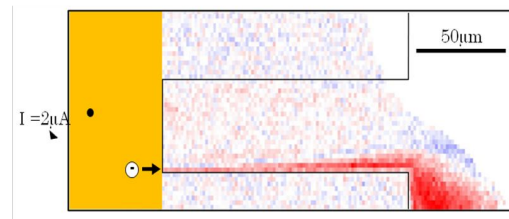


図6：Kerr 顕微鏡で測定した量子井戸試料でのスピンイメージング。左端の電極から電子が注入され試料下端を右向きに流れていく様子が分かる。電極から出たばかりの部分では、1ピクセル(2.5 μm 角)以下の幅で電流が出射されていることが見て取れる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

K. Kitahara, K. Oto, M. Nakajima, and K. Muro, Development of a High Resolution and Wide Band Terahertz Spectrometer Based on a 1 μm -Band External Cavity Diode Laser, 査読有, Review of

Scientific Instruments, **84**, 126102
(2013), doi 10.1063/1.4842275

[学会発表](計16件、抜粋)

長尾 佳介、有海 祐伺、桐生 直明、音 賢二、熊田 倫雄、平山 祥郎、2次元電子系のゆらぎによるKerrシグナルへの影響とスピンイメージング、日本物理学会第69回年次大会2014年3月28日、東海大学 湘南キャンパス

桐生 直明、長尾 佳介、鎌形 諒太、音 賢二、AlGaAs/GaAs ヘテロ構造における二次元電子系のスピン偏極計測、日本物理学会第69回年次大会2014年3月28日、東海大学 湘南キャンパス

舟瀬 基、中村 隆、音 賢一、数層グラフェンの量子ホール状態における磁気キャパシタンスと複素伝導度、日本物理学会第69回年次大会2014年3月27日、東海大学 湘南キャンパス

北原 憲、中嶋 誠、音 賢一、室 清文、狭線幅スペクトルの測定に向けた高分解能CW テラヘルツ分光システムの開発、第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日、同志社大学田辺キャンパス

長尾 佳介、軍司 雄太、桐生 直明、室 清文、音 賢一、熊田 倫雄、平山 祥郎、量子ホール電子系における希釈冷凍機温度でのKerr回転イメージング、日本物理学会第68回年次大会2013年9月28日、広島大学

軍司 雄太、長尾 佳介、桐生 直明、音 賢二、室 清文、熊田 倫雄、平山 祥郎、サニャック干渉計を用いた量子ホール電子系の高感度スピン偏極イメージング、日本物理学会第68回年次大会2013年9月27日、広島大学

K. Oto, Y. Gunji, K. Nagao, K. Muro, N. Kumada, and Y. Hirayama, High Sensitive Electron Spin Imaging in Quantum Hall Devices by Sagnac Interferometer, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2012), 2012年07月29日~08月03日、Zurich, Switzerland

Y. Shimane, and K. Oto, Transport properties in a suspended single wall carbon nanotube after current induced cleaning and ethanol absorption, 20th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nano technology (HMF), 2012

年7月22日~7月27日、Chamonix, France

Y. Gunji, K. Nagao, K. Oto, K. Muro, Electron spin imaging in quantum Hall devices by Sagnac interferometer, Topological lightwave synthesis and its applications 2012, 2012年7月5日~7月6日、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・教授
研究者番号: 30263198

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

室 清文 (MURO, Kiyofumi)
千葉大学・大学院理学研究科・グランドフェロー、研究者番号: 90112028