

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 12日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340077

研究課題名（和文） 量子ホール系における核スピン制御と電子スピン物性探求

研究課題名（英文） Electrical manipulation of nuclear spins in quantum Hall systems

研究代表者

町田友樹（MACHIDA TOMOKI）

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：00376633

研究成果の概要（和文）：整数および分数量子ホール効果ブレイクダウンによる動的核スピン偏極について実験的研究を行った。核スピンのポンプ&プローブ法を利用することにより、様々なランダウ準位充填率の量子ホール効果ブレイクダウンにより生じる動的核スピン偏極の極性を決定した。さらに量子ホール系における電子のドリフト方向に向かって動的核スピン偏極の偏極率が增大していくことを実験的に示した。

研究成果の概要（英文）：We have studied dynamic nuclear polarization induced by breakdown of the integer and fractional quantum Hall effect. By employing a pump and probe experiment, we determined the polarity of the dynamic nuclear polarization induced in the quantum Hall effect breakdown regime of various Landau level filling factors. We also demonstrated that the amplitude of dynamic nuclear polarization develops along the electron drift direction in the quantum Hall conductor.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
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：量子ホール効果

1. 研究開始当初の背景

量子ホール効果は強磁場中二次元電子系においてランダウ量子化・アンダーソン局在・電子間相互作用により生じる現象であり、固体物理学上の最も特異的な現象の1つである。量子ホール系においては電子スピンと母体材料である半導体原子核スピンの相互作用が電気伝導特性に顕著な影響を与えることが判明しており、量子情報技術への応用に向けた核スピン制御の側面および量子ホ

ール系における電子スピン-核スピン相互作用による特異な電気伝導特性と核スピン偏極メカニズムの解明という基礎的な側面の両方で興味を集めている。

我々は量子ホール端状態および量子ホールバルク状態を利用した2種類の核スピン制御手法を実現してきた。前者においては端状態間電子散乱に伴う電子スピン反転、後者では量子ホール効果ブレイクダウンに伴う電子スピン反転を利用している。いずれも超微

細相互作用を通じて核スピンを動的に偏極することが可能であり、電気抵抗値の変化として核スピンの偏極が検出できる。素子上の微小コイルによる核スピン量子状態のコヒーレント制御、スピンエコーによるコヒーレント時間の決定、電子スピン-核スピン間超微細相互作用のゲート電界制御によるナイトシフト測定を既に実現している。

2. 研究の目的

半導体核スピン制御技術は半導体素子において局所領域核スピンを電気的手法で制御できるため、量子情報メモリーへの応用が期待できる。また物性物理の側面からも、既存の実験技術ではアクセスできなかった電子スピン偏極に関する情報を引き出すための強力な実験手法でもある。核スピンをプローブとすることで、量子ホール系におけるスピン物性で鍵となる情報、局所的な電子スピン偏極率の決定や電子スピンドायナミクス情報が検出できる可能性がある。

そこで本研究では、量子ホール効果ブレイクダウンによる動的核スピン偏極に関して、その偏極メカニズム解明を主眼として実験を行った。具体的には、様々なランダウ準位充填率の整数・分数量子ホール系において量子ホール効果ブレイクダウンにより核スピン偏極が生じるかどうか、さらにその極性と偏極率を実験的に決定することを目的とした。また動的核スピン偏極の空間分布を明らかにすることで、量子ホール効果ブレイクダウンにおける電子加熱メカニズムとの関連を議論することを目的とした。

3. 研究の方法

半導体二次元電子系によりホールバー型素子を作製する。低温に冷却し、強磁場を印加することで電子系を量子ホール状態にする。核スピンのポンプ&プローブ法による動的核スピンの生成・検出を行う。まずランダウ準位充填率を調べたい量子ホール状態に設定し、電流を印加して量子ホール効果ブレイクダウンを生じさせ、一定時間保持する。続いてゲート電圧の調整により電子系をランダウ準位充填率 $\nu=1$ の量子ホール状態にして電流-電圧特性を測定する。核スピン偏極の形成により電流-電圧特性が変化すると期待される。この実験手法においては核スピン偏極の検出は $\nu=1$ 量子ホール状態で行っており、量子ホール効果ブレイクダウンの臨界電流値が減少した場合は核スピンの上向きスピン状態、増大した場合は下向きスピン状態に偏極していると決定できる。

さらに複数の電圧プローブを有するホールバー型素子において、ホール抵抗値の量子化値からのズレによって、量子ホール効果ブレイクダウンを検出することにより、伝導チ

ャネル方向の核スピン偏極の形成が検出した。

4. 研究成果

核スピンのポンプ&プローブ法による動的核スピンの生成・検出を行った。まずランダウ準位充填率1.9の量子ホール状態において電流を増大し、量子ホール効果ブレイクダウンを生じさせ、一定時間保持する。続いてゲート電圧の調整により電子系をランダウ準位充填率1の量子ホール状態にして電流-電圧特性を測定した。偏極時間の増大とともに、電流-電圧特性が変化の様子が観測された。核スピン偏極時間に対する臨界電流値変化がランダウ準位充填率1の量子ホール効果ブレイクダウン状態で核スピンを偏極した場合と逆向きであることから、ランダウ準位充填率1.9の量子ホール効果ブレイクダウンにより生じた動的核スピン偏極は下向きスピン状態であることが示された。さらに核スピン偏極に用いる電流値を変化させて核スピンのポンプ&プローブ実験を行ったところ、臨界電流値の変化は印加電流に対して顕著な依存性を示した。これは量子ホール効果ブレイクダウンにおける電子の励起過程に複数の過程があり、核スピンを上向きスピン状態へ偏極する過程と下向きスピン状態へ偏極する過程が共存することを示している。

一般に量子ホール効果ブレイクダウンは、低エネルギー側ランダウ準位中の局在電子が高エネルギー側ランダウ準位中の伝導電子に散乱されることにより励起され(ブートストラップ式電子加熱)、高エネルギー側ランダウ準位中の非局在伝導電子数が加速度的に増大(雪崩式伝導電子増大)した結果として理解される。そのため量子ホール系の電子温度は電子の進行方向とともに増大する。一方これまでの研究では、量子ホール効果ブレイクダウンにより核スピンの偏極し、動的核スピン偏極が量子ホール系の電気伝導特性を変化させる現象を観測していたものの、核スピン偏極の空間分布の情報が得られておらず、核スピン偏極メカニズムについては不明の部分が残されていた。

量子ホール効果ブレイクダウンにより核スピンを動的に偏極し、素子の周囲に設置したコイルに高周波電流を印加すると、GaAsの核磁気共鳴周波数において抵抗値が変化する。このスペクトルはホール抵抗値によって検出した核磁気共鳴に対応するため、伝導チャンネルと電圧端子の交差領域の電子系の状態を反映する。つまり、直列に並べられた3組の電圧端子を用いることで、核スピン偏極の空間分布に関する局所的な情報が得られる。

ホール抵抗値により検出した核磁気共鳴

スペクトル振幅の電流依存性を調べた。いずれの電流領域においても、核磁気共鳴の振幅は、電流注入端子から遠い領域で増大している様子が観測される。電流注入端子を反転させた場合、核磁気共鳴振幅の端子依存性は反転する。この結果は量子ホール効果ブレイクダウンによる動的核スピン偏極の空間分布に起因すると考えられる。核スピン偏極の空間分布とブートストラップ式電子加熱による雪崩式伝導電子増大に起因する電子温度の空間分布が同じ方向性を示しており、両者には密接な関連があることが示唆される。

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 3 件)

1. M. Kawamura, K. Kono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Spatial gradient of dynamic nuclear spin polarization induced by breakdown of the quantum Hall effect, *Phys. Rev. B* **83**, 041305-1-4 (2011), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.83.041305
 2. M. Kawamura, T. Yamashita, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Strain induced enhancement of electric quadrupole splitting in resistively detected nuclear magnetic resonance spectrum in quantum Hall systems, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 032102-1-3 (2010), 査読有
DOI: 10.1063/1.3291618
 3. M. Kawamura, M. Ono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya, and T. Machida, Dynamic nuclear polarization induced by breakdown of fractional quantum Hall effect, *Phys. Rev. B* **79**, 193304-1-4 (2009), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.79.193304
- [学会発表] (計 12 件)
1. 梅澤青司、守谷頼、山下達也、川村稔、橋本義昭、勝本信吾、増淵覚、町田友樹、偶数量子ホール状態ブレイクダウンを用いた動的核スピン偏極、日本物理学会 第 67 回年次大会、2012. 3. 27、大阪
 2. S. Umezawa, R. Moriya, M. Kawamura, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Dynamic Nuclear Polarization Induced by Breakdown of Even-integer Quantum Hall Effect, 2011 International Conference on Solid State Device and Materials (SSDM2011), 2011. 9. 30, Nagoya, Japan
 3. 町田友樹、量子ホール系における動的核スピン偏極、第 15 回半導体スピン工学の基礎と応用 (PASPS-15)、2010. 12. 21、筑波
 4. T. Yamashita, M. Kawamura, S. Masubuchi, R. Moriya, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Dynamic nuclear polarization induced by breakdown of even-integer quantum Hall states, The 19th International Conference on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (HMF-19), 2010. 8. 2, Fukuoka, Japan
 5. M. Kawamura, M. Ono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Dynamic nuclear polarization induced by breakdown of integer and fractional quantum Hall effect, The 19th International Conference on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (HMF-19), 2010. 8. 2, Fukuoka, Japan
 6. 川村稔、河野公俊、橋本義昭、勝本信吾、町田友樹、量子ホール効果ブレイクダウンによる動的核スピン偏極の電流方向依存性、日本物理学会第 65 回年次大会、2010. 3. 20、岡山
 7. 山下達也、川村稔、橋本義昭、勝本信吾、町田友樹、量子ホール効果ブレイクダウンにおける核スピン偏極極性の検出、日本物理学会第 65 回年次大会、2010. 3. 20、岡山
 8. M. Kawamura, M. Ono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Nuclear Spin Polarization Induced by Breakdown of Integer and Fractional Quantum Hall Effect, International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP), 2010. 3. 10, Tokyo, Japan
 9. M. Kawamura, T. Yamashita, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Enhancement of electric quadrupole splitting in resistively detected NMR spectrum in a breakdown regime of quantum Hall effect, International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics (ISQNN 2009), 2009. 11. 18, Tokyo, Japan
 10. 山下達也、川村稔、増淵覚、守谷頼、村木康二、町田友樹、核スピンをプローブとした量子ホール端状態におけるスピン偏極状態の検出、日本物理学会 2009 年秋

季大会、2009.9.25、熊本

11. M. Kawamura, T. Yamashita, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Strain-induced enhancement of electric quadrupole splitting in resistively detected NMR spectrum in quantum Hall systems, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS), 2009.7.23, Kobe, Japan
12. M. Kawamura, M. Ono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Nuclear spin polarization in the breakdown regimes of integer and fractional quantum Hall states, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS), 2009.7.23, Kobe, Japan

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

町田 友樹 (MACHIDA TOMOKI)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：00376633

(2) 研究分担者 なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 なし ()

研究者番号：