

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19204031

研究課題名（和文）量子ホール電子系による位相および核スピンの制御

研究課題名（英文）Control of nuclear spin system and its phase via quantum Hall electron systems

研究代表者

小宮山 進 (KOMIYAMA SUSUMU)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：00153677

研究成果の概要（和文）：量子ホール電子系における端状態の電子スピンと核スピン間の超微細相互作用を利用して、端状態の電子スピン固有状態と、核スピン偏極の生成・拡散・緩和のダイナミクスの双方を解明した。さらに、量子ポイントコンタクトや量子ドット系における電子の位相干渉性の特性を明らかにした。量子ホール電子系での電流不安定状態に伴う負微分伝導の発生、および電流による量子ホール崩壊現象における熱双安定性の存在を実証した。

研究成果の概要（英文）：Electron-spin eigenstates in quantum Hall edge channels as well as the dynamics of nuclear spin polarization in quantum Hall systems have been clarified by using hyperfine interaction between edge state electrons and nuclear spins. Specific features of electron coherence effects in the systems of quantum point contacts and quantum dots have been clarified. Occurrence of negative differential conductivity in quantum Hall electron systems as well as the existence of thermal bistability in the current-induced breakdown of the quantum Hall states have been experimentally revealed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2008年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2009年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2010年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
総計	35,500,000	10,650,000	46,150,000

研究分野：固体物理学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：量子ホール電子系、核スピン、端状態、位相干渉性、超微細相互作用

1. 研究開始当初の背景

(1) 核スピンの重要性：量子素子の新たな原理探索や開拓が進む中で、スピン自由度を利用することが重要な検討課題の一つとなっていた。その際、スピンのコヒーレント制御が基本的要素となるが、核スピンは電子スピンの位相を破壊する要素として重要であるばかりでなく、それ自体が量子状態のメモリーとして機能する点も重要である。これら双方の効果を固体素子に役立てるために研

究または開拓するには、固体中の核スピンを制御することが重要だが、その手段は、従来主に光に限られていた。しかし固体素子に展開することを考えるためには、電氣的制御手法の開発が望ましい。

(2) 研究開始当初、当研究グループは量子ホール電子系の端状態が核スピンの強力な電氣的制御手段を与える事を実験的に実証していた。つまり、①量子ホール電子系のスピ

ン分離した端状態が、動的核スピン偏極 (DNP) によって端状態に沿って局所的な核スピン分極を生成すること、さらに ②生成した核スピン偏極をリソグラフィーで作成するマイクロコイルによってコヒーレント制御 (パルス NMR) できることを示した。

2. 研究の目的

量子ホール電子系が有する顕著な特徴を最大限に利用することによって、位相制御や核スピン制御への応用展開を追求することを主眼とした。具体的に以下の課題を追求した。

(1) 核スピン偏極のダイナミクス探究：固体中核スピンの電氣的制御をさらに進める事を目指した。具体的には、量子ホール系端状態に生ずる電子スピンの非平衡分布によって誘起される核スピン偏極を研究対象とし、その空間プロファイルをナノメートル精度で明らかにし、さらにその時間発展を追及する。それらの事で、核スピン偏極のダイナミクス (生成・拡散・緩和) 解明を目指し、核スピン制御の可能性拡大を目指した。さらに、核スピン偏極をナノスケールプローブとして、量子ホール端状態 (電子スピン) の新たなマイクロコピーの開始を目指した。

(2) 量子ドット中電子系や量子ホール系の位相干渉性の探求とその制御。

(3) 量子ホール電子系の非平衡状態の解明。

3. 研究の方法

(1) 核スピン偏極のダイナミクス探究：ポテンシャル障壁を持つ GaAs 系量子ホール素子を試料とする。直流電流によって低温 (50mK から 1K) でスピン分離した端状態に非平衡分布を作り、電子スピンと核スピンのフリップフロップ散乱によって動的核スピン偏極 (DNP) を起こし、生成した核スピン偏極の空間プロファイルおよび時間依存性を、端状態のホール抵抗を指標として読み出す。その際、サイドゲートのバイアス電圧によって、端状態の位置を 600nm 程度の範囲、ナノメートル精度で挿引する。

(2) GaAs 系の高移動度単一ヘテロ構造結晶を用いて、量子ポイントコンタクト、量子ドット、単電子トンネリング素子、およびクロスゲート構造で多重に連結した 2 次元電子系素子をリソグラフィーにより作成し、ゼロ磁場中の電子系および量子ホール電子系の輸送現象を調べ、電子系の位相干渉性について情報を得る。

(3) 量子ホール電子系の非平衡状態の解明のために、GaAs 系単一ヘテロ構造結晶中の

2 次元電子系によるホール素子 (およびコルビノ素子) を作成し、素子に流す電流 (加える電圧) の関数として、縦抵抗、ホール抵抗を高精度計測して電流不安定性の発現を調べる。また、ステップ的な電流 (電圧) に対する応答から熱的安定性の存在を確認する。

4. 研究成果

(1) 核スピン偏極のダイナミクス探究

図 1 に示すように、量子ホール電子系のスピン分離した端状態 ($\nu=1\uparrow$ と $\nu=1\downarrow$) に非平衡分布を生成し、超微細相互作用によって電子スピンと核スピンがフリップ・フロップ散乱を起こすことで核スピン偏極を生成する (DNP: 動的核スピン偏極)。

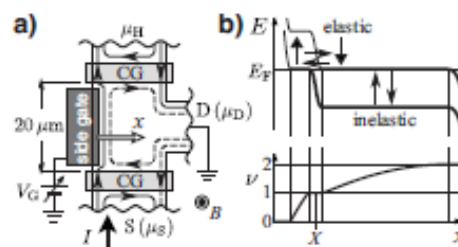


図 1 : (a) 試料配置 (b) 端状態でのエネルギーランダウ準位占有率の模式図

①核スピン偏極の空間プロファイル計測

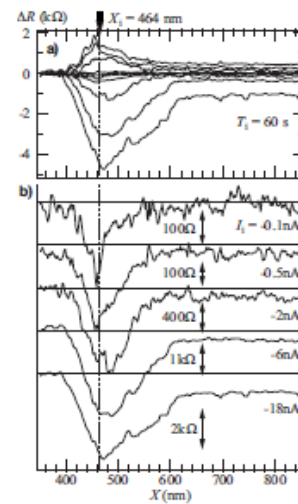


図 2 : 核スピン偏極の空間プロファイル

サイドゲート電圧 (図 1 a) によって端状態の位置を挿引しつつ上記の効果を利用する事で、核スピン分極のナノメートル精度での顕微計測を実現し、核スピンの空間分布を明らかにした (図 2)。このように、核スピン偏極に対して、端状態がナノメートルオーダーの分解能を持つ、極めて敏感で挿引可能なプローブとして働く事を示した。

②生成・拡散・緩和

核スピン偏極の分布プロファイルの時間発展を調べることで(図3)、核スピン偏極の生成過程、および拡散・格子緩和による減衰過程をナノメートルスケールの空間分解能で明らかにした。特に2次元電子系との接触によって減衰が大きく異なる事を見出した。

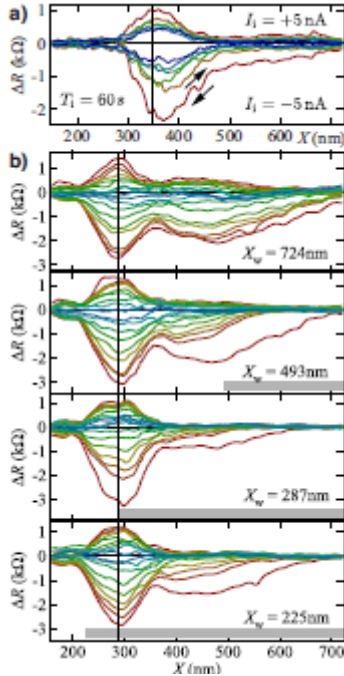


図3：核スピン偏極プロファイルの時間減衰(生成直後から600秒後まで)

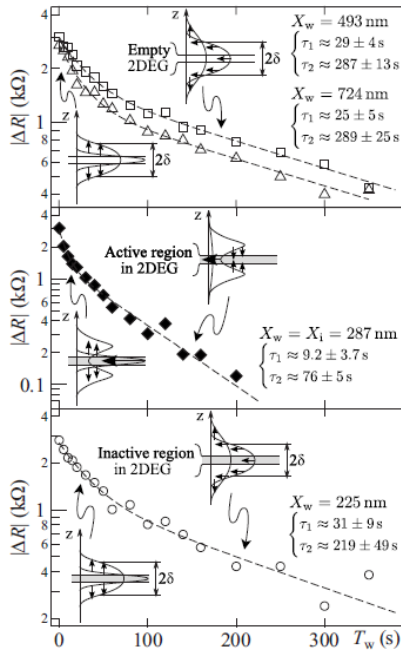


図4：X=285nm(図3(b)での核スピン偏極の減衰曲線とダイナミクス【インセット】。

図3(b)が示すように、核スピン偏極の減衰速度は、減衰の間に端状態をどの位置(図3(b)各コラム基線の灰色の棒)に置かかによって大きく異なる。図3(b)の上二つのコラムのように、核スピンの2次元電子系に接触しない(超微細相互作用が働かない)場合は、まず核スピン偏極が量子井戸面に垂直に(量子井戸の外に)拡散する事で減衰し、その後、格子緩和により全体としてゆっくり減衰する(図4(b)の上段)。次に、図3(b)の上から3番目のコラムのように、核スピン系が $\nu=1$ の端状態に接触する場合は、電子による緩和(図1(b))が加わって全体的にスピードアップする(図4(b)中段)。さらに、図3(b)の最下コラムのように、核スピン系が $\nu>1$ の端状態に接触する場合は、接触にもかかわらず(図1(b))エネルギー収支のためにフリップ・フロップ散乱が禁止され、減衰の様子(図4(b)下段)は電子系に接触しない場合(図4(b)上段)に類似する。

核スピン偏極の拡散と格子緩和について、レート方程式によるシミュレーションを行い、核スピン偏極のダイナミクスを実験・理論両面から明確にした。

③Spin-textured edge states

端状態が、ある条件下で核スピン偏極の減衰を劇的に加速する事を見出した(図5下段)

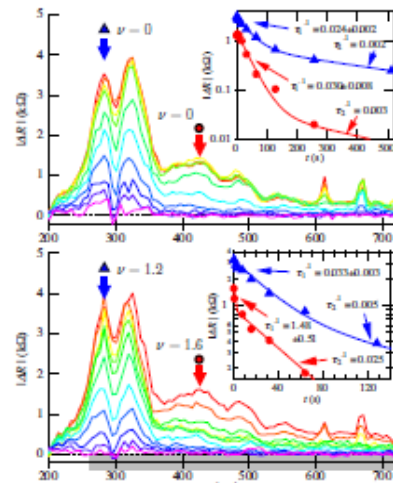


図5 異常に早い核スピン偏極の減衰。

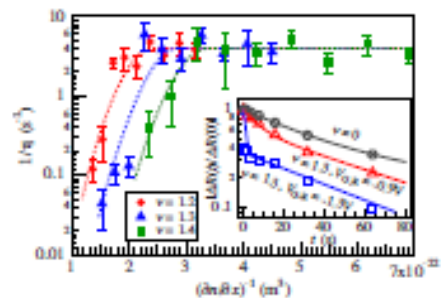


図6 減衰速度 vs. 1/ポテンシャル勾配。

X=420nm、 $\nu=1.6$)。端状態の位置によって大きく異なるが、それがランダウレベル占有指数によるものではなく、端状態の囲い込みポテンシャル勾配による事を見出した。つまり、図6が示すように一定の占有指数($\nu=1.2\sim 1.4$)において、囲い込みポテンシャル勾配の減少に伴って、核スピン偏極の減衰速度が劇的に増大する。この顕著な依存性と磁場強度依存性から、端状態にスカーミオンと生成され、特殊なスピネクスタチャー状態となっていることを初めて明らかにした。これは10年以上前に、理論的に予言されていた物理現象の初めて実験的検証であり、スピン自由度を含めた量子ホール端状態の固有状態を初めて明らかにしたと言える。
子系や

(2) 量子ドット中の電量子ホール系の位相干渉性の探求とその制御
量子ホール・プラトー間の遷移幅の試料サイズ依存性を数ミクロン角程度までの微小試料で研究した(図7)。結果は従来のアンダーソン局在の描像では説明できず、試料サイズ(L)が乱雑ポテンシャル揺らぎの相関長(L_{cor})より小さくなると、アンダーソン局在に支配される領域から外れて、ポイントコンタクトのような、準古典的なパーコレーション的な遷移に移行する事が解った。

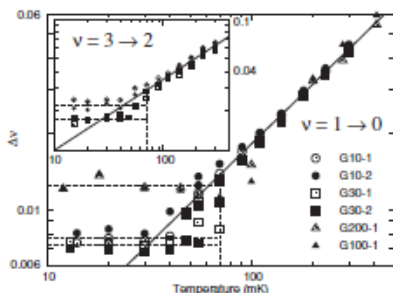


図7：微小試料における量子ホール遷移幅の温度依存性

(3) 量子ホール電子系の非平衡状態の解明。
強磁場中電子系の負微分伝導現象の一般論が30年以上前に理論的に定式化され、電流不安定化の現象が予言されていた。強磁場下電子系の負微分伝導に対するその一般的予言を、量子ホール電子系を用いて実験的に初めて見出した(図8)。電流の敷居値以上で電流不安定が起っており、その敷居値は、伝導度テンソルの非線型成分から理論的に予測される値に正確に一致する。

量子ホール効果の電流増大に伴う崩壊現象に電子温度に関する熱双安定性が関連している事を実証した。図9に示す低温安定状態(量子ホール効果)→不安定状態→過程高温安定状態(崩壊)の過程を、ノコギリ波の

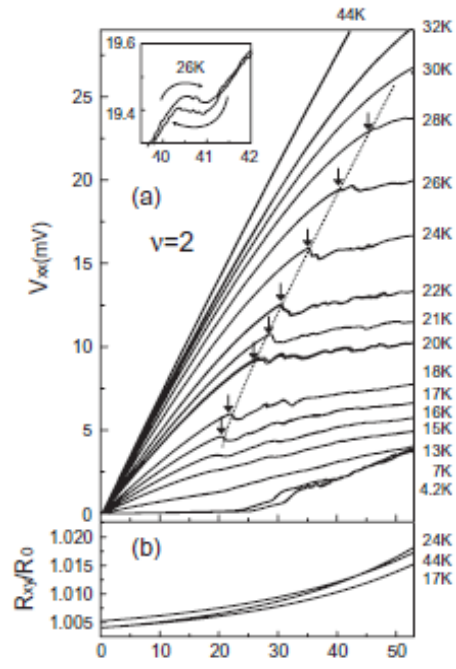


図8：負微分伝導による電流不安定の出現

に電流を加えて、ストカスティックに生ずる応答(図10)を解析することで明らかにした。

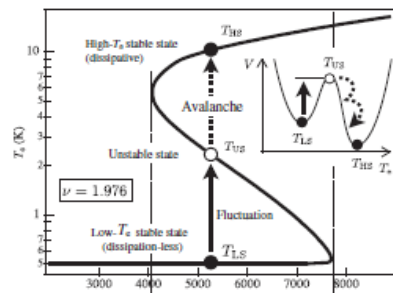


図9：熱双安定状態における状態間遷移

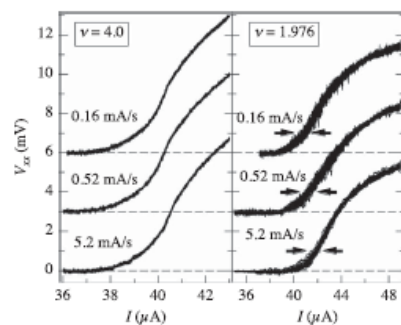


図10：量子ホール効果崩壊現象における熱双安定状態間の遷移

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① T. Nakajima, Y. Kobayashi, S. Komiyama, Spin-textured edge states probed by local nuclear spin polarization, Phys. Rev. B 82, 201302 R(1-4), 2010, 査読有り
- ② T. Nakajima, Y. Kobayashi, S. Komiyama, M. Tsuboi, T. Machida, Scanning microscopy of nuclear spin polarization via quantum Hall edge channels, Phys. Rev. B 81, 85322(1-7), 2010, 査読有り
- ③ T. Nakajima, S. Komiyama, Lifetime of dissipation-less state of quantum Hall electron systems in the bistable regime, Physica E 42, 1026-1029, 2010, 査読有り
- ④ J. C. Chen, Y. Tsai, Y. Lin, T. Ueda & S. Komiyama, Negative differential conductivity of two-dimensional electron gas systems in high magnetic fields, Phys. Rev. B 79, 075308(1-7), 2009, 査読有り
- ⑤ T. Nakajima, T. Ueda, S. Komiyama, System-Size Dependence of Quantum Hall Transitions, J. Phys. Soc. Jpn, 76, 94703(1-6), 2007, 査読有り

[学会発表] (計 11 件)

- ① 小宮山進, 量子ホール効果崩壊現象における熱双安定性, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学津島キャンパス (岡山)
- ② T. Nakajima, Spin States in Edge Channels Probed via Relaxation of Local Nuclear Polarization, International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP2010), 2010 年 3 月 9 日, 東京大学駒場キャンパス数理研究科大講義室(東京)
- ③ T. Nakajima, Lifetime of dissipation-less state of quantum Hall electron systems in the bistable regime, 18th International Conference on the Electronic Properties of

Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), 2009 年 7 月 20 日, 神戸コンベンションセンター (兵庫)

- ④ T. Nakajima, System-size dependent quantum Hall transition, 17th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-17), 2007 年 7 月 16 日, Genova, (Italy)

[その他]

<http://dbs.c.u-tokyo.ac.jp/~komiyama/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小宮山 進 (KOMIYAMA SUSUMU)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号 : 00153677

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

中島 峻 (NAKAJIMA TAKASHI)

東京大学大学院総合文化研究科・助教

研究者番号 : 60534344

陳 正中 (CHEN JENG-CHUNG)

台湾 国立清華大学物理学部・准教授

樋田 啓 (TOIDA HIRAKU)

東京大学大学院総合文化研究科・広域化学

専攻・相関基礎科学系・博士課程