

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340065

研究課題名(和文)半導体低次元電子系における核スピン偏極の電氣的検出

研究課題名(英文)Electrical detection of nuclear spin polarization in low-dimensional electron systems based on semiconductors

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：AlGaAs/GaAs二次元電子系ホールバー型素子を作製し、偶数量子ホール状態における動的核スピン偏極をpump&probe検出法により検出した。偶数ランダウ準位充填率の量子ホール状態においてはブレイクダウンに伴う電流-電圧曲線のヒステリシスが観測されないため動的核スピン偏極が生じないと一般に理解されていたが、偶数量子ホール状態においても量子ホール効果ブレイクダウンに起因する動的核スピン偏極が生じることを示す実験結果である。さらに、AlGaAs/GaAs量子ポイントコンタクト系の電気伝導特性で近藤共鳴ピークが磁場で分裂した状態において、電気伝導測定により、動的核スピン偏極の効果を検出した。

研究成果の概要(英文)：We fabricated AlGaAs/GaAs Hall-bar devices and conducted pump&probe detection of nuclear spin polarization in two-dimensional electron gas under even filling quantum Hall regime. We detected dynamic nuclear polarization by measuring hysteresis of current-voltage characteristics. The results suggest that nuclear spin can be electrically polarized by breakdown of even filling quantum Hall effect. We also detected dynamic nuclear polarization in quantum point contact system under Kondo effect regime.

研究分野：固体物性

キーワード：半導体核スピン 量子ホール効果 低次元電子系

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始時点で、研究代表者は量子ホール2次元電子系(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いた。前者で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ー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偏極が検出できる。より具体的には、前者では、スピン分離量子ホール端状態間で形成される非平衡分布を利用している。ランダウ準位充填率が2の量子ホール状態において、ショットキーゲートを利用して、ゲート領域のランダウ準位充填率を1にすると、ゲートにより内側のスピン下向き量子ホール端状態は反射される。そのため、ゲートで挟まれた領域においては、スピン上向きの量子ホール端状態とスピン下向きの量子ホール端状態が並行して伝搬している。スピンの異なる量子ホール端状態間では散乱が抑制され、巨視的な距離に渡って非平衡分布が緩和しないことが知られている。ソースドレイン電極に電流を印加すると、外側のスピン上向き量子ホール端状態と内側のスピン下向き量子ホール端状態で異なるエネルギーまで電子が充填された状況が実現する。従って、量子ホール端状態間散乱による混合でスピンの反転が一方通行で連続的に生じるため、電流の極性によって、電子スピンを上向き・下向きおよび下向き・上向きのいずれかの反転連続的に引き起こすことが可能になる。電子スピン反転は電子スピン-核スピン間超微細相互作用により、逆向きの核スピン反転を引き起こすため、電流の連続的な印加により、核スピンが動的に偏極する。偏極の極性は電流の極性で選択可能である。核スピンが上向きに偏極した場合、電子スピン-核スピン間超微細相互作用により、電子スピンの実効的なゼーマン分離エネルギーが減少する。つまり、外部磁場に対して、逆向きの実効的な磁場が加わることに等価である。従って、量子ホール端状態間の空間的な距離が縮まり、波動関数の重なりが増大し、結果的に量子ホール端状態間散乱が促進される。核スピンが下向きに偏極した場合、電子スピンの実効的なゼーマン分離エネルギーが増大する。つまり、外部磁場に対して、同じ向きの実効的な磁場が加わることに等価である。従って、量子ホール端状態間の空間的な距離が広がり、波動関数の重なりが現象し、結果的に量子ホール端状態間散乱が抑制される。量子ホール端状態間散乱の頻度によりホール抵抗値が変化するため、結果として、ホール抵抗値の測定により、核スピン偏極の検出が可能となる。

量子ホール効果ブレークダウンの利用では、スピン分離量子ホール状態において電流を印加して、量子ホール効果ブレークダウン

を引き起こす。量子ホール効果ブレークダウンの利用では、スピン分離量子ホール状態において電流を量子ホール効果印加して、量子ホール効果ブレークダウンを引き起こす。スピン分離量子ホール状態における量子ホール効果ブレークダウンにおいては、上向きスピン偏極のランダウ準位から上向きスピン偏極のランダウ準位へ電子が叩き上げられるため、電子スピンの反転が伴う。電子スピンと核スピンとの間の超微細相互作用により、核スピンが下向き・上向きに反転させられるため、核スピンが上向きに動的に偏極する。上向きの動的核スピン偏極は電子スピンの実効的なゼーマン分離エネルギーを減少するため、ランダウ準位間のエネルギー間隔が小さくなることにより電子が余分に叩き上げられやすくなるため、量子ホール効果ブレークダウンが促進される。その結果として、電流-電圧特性において、量子ホール効果ブレークダウンの臨界電流値が核スピンの偏極により減少するため、縦抵抗測定により、核スピンの動的核スピン偏極が検出可能になる。

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。核スピン偏極の空間分布検出の技術開発も開始していた。

一方、偶数・分数量子ホール効果ブレークダウン、量子ホール遷移状態においては動的核スピン偏極は生じないと理解されてきた。しかし核スピン偏極の抵抗検出では核スピンの偏極率と検出感度(ランダウ準位充填率に強く依存)を独立して考慮する必要がある。そこで核スピンの偏極と検出を異なる電子状態で行う pump&probe 法を利用する着想に至った。動的核スピン偏極が生じないとされてきた系でも電流印加により核スピンが偏極していることを示せると期待される。さらに1次元電子系および0次元電子系へと研究対象を広げ、既存の実験技術ではアクセスできない電子スピン状態に関する情報を引き出すことは意義が大きい。

## 2. 研究の目的

半導体低次元電子系(0次元・1次元・2次元)における電子スピン-核スピン相互作用の理解を深め、核スピンの電氣的偏極/検出手法を確立する。未解明の核スピン偏極メカニズム(偶数量子ホール状態、分数量子ホール状態、量子ホール遷移状態)を解明するとともに、対象を1次元系・0次元系へ拡張し、新たなメカニズムによる核スピンの電氣的偏極/検出を実現する。抵抗検出 NMR ナイトシフトおよび核スピン緩和時間(T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>)をプローブとして、低次元電子系の電子スピン状態・非平衡状態における電子スピンドイナ

ミクスを調べる。

電流印加のみで核スピンの偏極し、電気抵抗測定で核スピン偏極が検出できるという固体物理的な興味、半導体核スピンの電気的コヒーレント制御による量子ビット開発という側面に加え、核スピンの電気的制御技術は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して電子スピン状態を検出する手法は、例えば一般的なピックアップコイルを用いた核磁気共鳴と比べて、(a)5桁以上優れた感度、(b)ナノスケール領域の核スピンのみを選択的に検出可能、という特色がある。また本計画における0次元電子系における近藤効果を利用した核スピン偏極/検出は全く新しい手法の試みである。1次元電子系における核スピン偏極は初期的な実験に限られており、全く未解明の偏極メカニズムの解明に意義がある。量子ホール2次元電子系では、核スピン偏極が生じているにもかかわらず存在が認知されていない現象、誤って理解されている現象が数多くある。Pump&probe法により核スピン偏極/検出メカニズムを統一的に理解することが非常に重要である

### 3. 研究の方法

AlGaAs/GaAs量子ホール2次元電子系において核スピンのpump&probe検出を行い、偶数量子ホール状態、分数量子ホール状態、量子ホール遷移状態における核スピン偏極メカニズムを解明する。特に、偶数ランダウ準位充填率の量子ホール状態においては量子ホール効果ブレイクダウンに伴うI-Vヒステリシスが観測されないため動的核スピン偏極が生じないと一般に理解されている。この間違った理解をくつがえすため、偶数量子ホール状態における動的核スピン偏極をpump&probe検出法により実証する。量子ホール効果ブレイクダウンでは、電子が上のランダウ準位に叩き上げられ、伝導電子となる事により、有限の縦電圧を生じさせる。偶数量子ホール状態における量子ホール効果ブレイクダウンの過程においても電子スピンの反転が伴うことが予想され、下向きスピン偏極のランダウ準位から上向きスピン偏極のランダウ準位へ電子が叩き上げられるとすると、電子スピンの反転が伴い、電子スピンと核スピンの間の超微細相互作用により、核スピンの反転が下向きに動的に偏極するため、核スピンの反転が下向きに動的に偏極する。下向きの動的核スピン偏極は電子スピンの実効的なゼーマン分離エネルギーを増大するため、ランダウ準位間のエネルギー間隔が大きくなることにより電子が叩き上げずらくなるため、量子ホール効果ブレイクダウンが抑制される。しかし、偶数整数の量子ホール状態においては、もともとのランダウ準位間隔がゼーマン分離エネルギーではなく、サ

イクロトロンエネルギーであるため、スピン分離のゼーマン分離エネルギーよりもはるかに大きく、核スピン偏極が生じたとしても、実効的な電子スピンのゼーマン分離エネルギーの変化によるランダウ準位間隔のエネルギー変化は相対的に小さいため、電気伝導特性への影響が小さいと予想される。しかし、核スピンをプローブする過程においては偶数整数の量子ホール状態ではなく、奇数整数の量子ホール状態における量子ホール効果ブレイクダウンを測定して、核スピン偏極による電子スピンのゼーマン分離エネルギーの変化を検出することで、非常に敏感に核スピンによる変化を検出することが可能になると期待される。

さらに、複数の電圧プローブを用いてホール抵抗値により核スピン偏極を検出することで、核スピン偏極の電流方向の空間分布を求め、核スピン偏極メカニズムを解明する。ブートストラップ式の電子加熱の原理により量子ホール効果ブレイクダウンが生じると仮定すると、電子温度の上昇にはある程度の距離が必要であるため、電子の注入方向と、電子の注入端子からの距離が重要な役割を果たす。量子ホールブレイクダウンの成長は電子の注入端子から、少しずつ生じていき、最終的に量子ホールブレイクダウンにより有限の縦電圧が生じると考えられるため、多くの端子を有するホールバー型素子における量子ホール効果ブレイクダウンの測定では、各端子間の電圧をプローブとして、量子ホール効果ブレイクダウンが空間的に発展していく様子が観測されると期待される。核スピンの動的な偏極過程において、量子ホール効果ブレイクダウンに伴う電子スピンの反転が電子スピンと核スピンの間の超微細相互作用を通じて引き起こされる核スピンの反転に起因すると予想されるため、核スピンの動的な偏極の偏極率も、電子の注入方向と、電子の注入端子からの距離が重要な役割を果たすと期待される。その場合、核スピンの動的に偏極に起因する縦電圧の変化がやはり空間的に発展していく様子が観測できると期待されるため、多くの電圧端子を有するホールバー型素子において、各端子間の電圧測定により、量子ホールブレイクダウンの様子をプローブとして、核スピンの空間的な発展が測定できると考えられる。電流の極性の反転、磁場の極性の反転、素子の磁場中での回転により傾斜による並行磁場の印加、それに伴う電子スピンのゼーマン分離エネルギーの変化を利用して、系統的に核スピンの偏極の変化を量子ホール効果ブレイクダウンを通じてプローブすることが可能になると期待される。

また、AlGaAs/GaAs量子ポイントコンタクトおよびInAs量子ドット0次元電子系における近藤効果を利用して、核スピン偏極の電気伝導検出を行う。2次元電子系上のスプリットゲートにより作製した量子ポイントコ

ンタクトでは、不純物に局在した0次元電子系が形成され、局在不对電子スピンの人工の磁性不純物として振る舞う。量子ポイントコンタクトは、半導体 AlGaAs/GaAs ヘテロ構造における二次元電子系をベースとして、ショットキーゲートを利用してゲート下部の電子濃度を減少させ、電子系を消失されることで、非常に細い伝導チャネルが実現出来、量子ポイントコンタクトとして振る舞わせることが可能になる。伝導度の測定により、伝導度の量子化が観測され、伝導に寄与するチャネルの数、伝導チャネルの透過率がポイントコンタクトに印加するゲート電圧の調整により制御可能になる。

近藤温度以下の低温では、伝導電子と局在スピンの反強磁性的な交換相互作用により結合し、近藤共鳴によるトンネル伝導が可能になる。さらに外部磁場を印加すると近藤共鳴が抑制され、近藤共鳴ピークの分裂が生じる。その分裂幅はゼーマンエネルギーに対応するため、核スピンの偏極している場合は核スピン実効磁場により分裂が変化する。近藤共鳴ピーク間の領域では、ごくわずかな核スピン実効磁場でも電子系の多体効果である近藤共鳴を顕著に抑制し、検出可能な電気伝導度変化が生じると予想される。従って、近藤共鳴の抑制領域においては核スピン偏極の検出感度が特異的に高くなると期待される。

#### 4. 研究成果

ゲート付き AlGaAs/GaAs 二次元電子系ホールバー型素子を作製し、偶数量子ホール状態における動的核スピン偏極を pump&probe 検出法により検出した。二次元電子系は分子線エピタキシー法により作製された AlGaAs/GaAs ヘテロ構造中の二次元電子系を利用する。一般的なリソグラフィ手法と蒸着、リフトオフ、エッチングなどを利用して、ホールバー型形状やコルビノ型形状の素子にして、オーミック電極を付与することで、電気伝導測定を可能にする。金属を表面に蒸着することにより、ショットキーゲートを付与することが可能であり、ゲート下部の電子濃度を連続的に調整することが可能になる。従って、ゲート下部の領域の電子系のランダウ準位充填率を自在に調整することが可能である。

偶数ランダウ準位充填率の量子ホール状態においてはブレイクダウンに伴う電流-電圧曲線のヒステリシスが観測されないため動的核スピン偏極が生じないと一般に理解されていたが、偶数量子ホール状態においても量子ホール効果ブレイクダウンに起因する動的核スピン偏極が生じることを示す実験結果である。

AlGaAs/GaAs 二次元電子系コルビノ型素子においても同様の実験を行った。量子ホール端状態の影響が排除できるコルビノ型素子

を利用して、通常のホールバー型素子と同様の結果が得られたことは、二次元電子系のバルク領域における量子ホール効果ブレイクダウンが本質的な役割を果たしていることを示している。

また、量子ホール遷移状態における動的核スピン偏極のメカニズムを調べるため、縦抵抗測定を用いた動的核スピン偏極検出と非局所抵抗測定を用いた動的核スピン偏極検出を組み合わせることで、量子ホール遷移状態における動的核スピン偏極のメカニズムを調べた。整数量子ホール状態間の遷移領域においても電流の印加により核スピン偏極が生じるが、その偏極極性は複雑な振る舞いを示しメカニズムが未解明であった。特に量子ホール端状態とバルク状態の寄与が不明であった。バルク領域における電子励起に起因する動的核スピン偏極効果と量子ホール端状態-バルク状態間散乱に起因する動的核スピン偏極効果の2つの効果が共存していることを示している。

さらに、AlGaAs/GaAs 2次元電子系から作製した量子ポイントコンタクトの電気伝導特性で近藤共鳴ピークが磁場で分裂した状態において、電気伝導測定により、動的核スピン偏極の効果を検出した。近藤効果状態にある0次元電子系に対して電流を印加することで、核スピンの動的に偏極することを示している。また同時に、近藤共鳴ピークの分裂は実効的なスピン分裂エネルギーに依存することを利用して、核スピン偏極の変化による電子スピンのゼーマン分離の変化を通じて、電気伝導特性が変化して、核スピン偏極を検出可能であることを示している。

#### 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2件)

[1] M. Kawamura, D. Gottwald, K. Ono, T. Machida, K. Kono, "Resistive detection of nuclear spins in a single quantum dot under Kondo effect regime", Phys. Rev. B **87**, 81303(R)-1-5 (2013). (査読あり) [10.1103/PhysRevB.87.081303]

[2] K. Chida, T. Arakawa, S. Matsuo, Y. Nishihara, T. Tanaka, D. Chiba, T. Ono, T. Hata, K. Kobayashi, and T. Machida, "Observation of finite excess noise in the voltage-biased quantum Hall regime as a precursor for breakdown", Phys. Rev. B **87**, 155313 (2013). (査読あり) [http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.155313]

[学会発表](計1件)

[1] S. Umezawa, R. Moriya, M. Kawamura, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, T. Machida, "Dynamic Nuclear Polarization Induced by Breakdown of Even-integer Quantum Hall Effect in a Corbino Ring", 20th International Conference on "High Magnetic Fields in Semiconductor Physics", Poster 35, 110, Chamonix, France (2012年7月29日発表). (査読あり)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔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

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：