

平成 20年 9月 30日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740179
 研究課題名（和文） 単一電子トランジスタを用いた量子ホール系の局所核スピン偏極検出
 研究課題名（英文） Local detection of nuclear spins in quantum Hall systems by means of single electron transistors
 研究代表者
 川村 稔 （KAWAMURA MINORU）
 東京大学・生産技術研究所・特任助教
 研究者番号：60391926

研究成果の概要：単一電子トランジスタを用いて量子ホール状態における核磁気共鳴信号を得るために核スピン偏極方法の最適化をおこなった。幅の狭いホールバー試料に量子ホール効果ブレイクダウンの臨界電流値よりわずかに大きな電流を印加した場合に、核磁気共鳴信号が最大となることを見出した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	0	2,200,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	210,000	3,110,000

研究分野：半導体低温物性

科研費の分科・細目：メゾスコピック系・局在

キーワード：量子ホール効果、核スピン、単一電子トランジスタ

1. 研究開始当初の背景

分数量子ホール状態のスピン相転移点近傍において、核スピンが動的に偏極することが発見され、量子ホール効果状態の電子輸送現象において核スピン-電子スピン相互作用が重要な役割を果たすことが明らかになってきた。スピン相転移点近傍以外にも、整数量子ホール効果の端チャンネル間非平衡分布状態、整数量子ホール効果ブレイクダウン領域、端チャンネル-バルクチャンネル間非平衡分布状態においても、量子ホール伝導体に電流を流すことにより、核スピンが動的に偏極することが知られている。いずれの場合も伝導電子のスピン反転が超微細相互作用を通じて核スピンを偏極すると考えられている。

しかし、伝導電子のスピン反転がどのようにして生じるのか、そのメカニズムは十分に理解されていない。特に量子ホール効果ブレイクダウンによる核スピン偏極では、ブレイクダウン現象が非局所的に生じることを反映して、核スピン偏極が空間分布を持つことが期待される。しかし、この核スピン偏極の空間分布は理論的にも実験的にも未解明であり、大きな研究課題として残されている。

2. 研究の目的

核スピン偏極の空間分布を測定するためには、核スピンを局所的に検出する局所プローブの開発が不可欠である。本研究の目的は、単一電子トランジスタを用いて、トランジ

スタ直下のナノスケール領域の核磁気共鳴信号を局所的に検出する方法を確立することである。核スピンの偏極・緩和は超微細相互作用を通じて電子系の化学ポテンシャルを変化させる。単一電子トランジスタを使えば、この電子系の化学ポテンシャルの変化を局所的かつ高感度に検出することが可能である。ナノメートル領域の核磁気共鳴検出技術を用いて、量子ホール系の核スピン偏極の空間分布を測定し、量子ホール系における核スピン偏極のメカニズムを解明する。

3. 研究の方法

(1) 単一電子トランジスタを用いた核磁気共鳴検出手法の確立

量子ホール効果測定用のホールバー型素子の上に電子線リソグラフィとアルミニウムの斜め蒸着法を用いて単一電子トランジスタを作製する。トンネル障壁はアルミニウムを酸化させることによって形成する。単一電子トランジスタを流れる微小電流を測定するために微小電流増幅器とロックイン増幅器を用いた位相検波測定を行う。ホールバー型素子のまわりにコイルを巻き、高周波磁場を印加する。核磁気共鳴が生じると、電子系の化学ポテンシャルが変化する。この化学ポテンシャル変化を単一電子トランジスタの電流変化として検出する。

(2) 核スピン偏極条件の最適化

単一電子トランジスタで大きな信号を得るために、核スピン偏極条件の最適化をおこなう。ホールバー型試料の幅、アスペクト比、ランダウ準位充填率、磁場の大きさを変化させ、抵抗測定による核磁気共鳴信号が最大になるように核スピン偏極条件を最適化する。

(3) パルス交流磁場による核磁気共鳴

核磁気共鳴による化学ポテンシャルの変化は、パルスと呼ばれるパルス状の交流磁場を印加した時に最大になる。単一電子トランジスタで検出する信号を大きくするために高周波パルス技術を用いたパルス核磁気共鳴の実験をおこなう。

(4) 量子ホール効果ブレイクダウンによる核スピン偏極の空間分布測定

ホールバー型素子の上に複数個の単一電子トランジスタを配置し、単一電子トランジスタによる核磁気共鳴測定をおこなう。それぞれのトランジスタの信号強度の相対的な違いから核スピン偏極の空間分布を調べ、核スピン偏極メカニズムを解明する。

4. 研究成果

(1) アルミニウム / アルミニウム酸化膜を用いて単一電子トランジスタの作製をおこなった。トンネル障壁となるアルミニウム酸

化膜の膜質に問題があり、単一電子トランジスタ素子の作製が計画通り進まなかったが、膜質を改善することにより、適当な抵抗値を有する単一電子トランジスタ素子が作製できるようになった。作製した素子を用いて核磁気共鳴信号の測定を試みたが、信号は得られなかった。原因の一つとして、単一電子トランジスタと2次元電子系との間の電気容量が小さすぎたことが挙げられる。単一電子トランジスタと2次元電子系の距離を近づけて、結合を強くすることで信号検出につながる可能性がある。また、核スピン偏極が十分に大きくなかったことも原因の一つとして考えられる。下記(2)、(3)に基づいて核スピン偏極条件を最適化する必要がある。

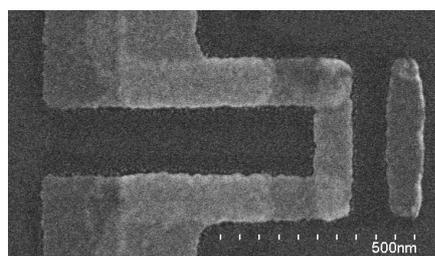


図1：2次元電子系を含む GaAs 基板上に作成した単一電子トランジスタの電子顕微鏡写真。

(2) 同じウェハから作製したいくつかの形状のホールバー型素子を用いて、量子ホール効果ブレイクダウンによる核スピン偏極の実験をおこない、核磁気共鳴信号の大きさを比較した。その結果、ホールバーの幅の細かい試料の方が大きな核磁気共鳴信号が得やすいことが明らかになった。また、同じ幅の試料で比較すると、ホールバーの長さの長い試料の方がより大きな核磁気共鳴信号が得られることが明らかになった。

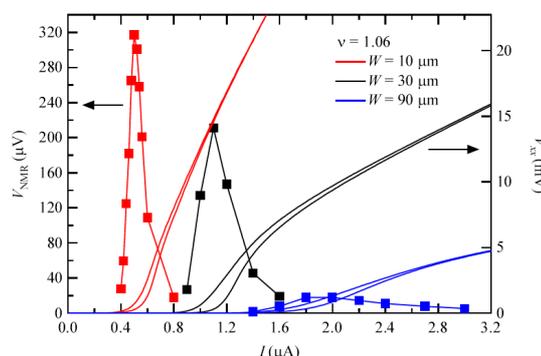


図2：核磁気共鳴信号の大きさの電流値および試料幅依存性。

ランダウ準位充填率依存性の実験では、充填率が1よりも小さくなると、核磁気共鳴信号が急激に減少することが明らかになった。この充填率依存性の原因は明らかではないが、核スピン偏極のメカニズムを解明するうえで重要な手がかりになると考えられる。

ランダウ充填率依存性の実験の過程で、核磁気共鳴周波数がランダウ準位充填率に応じて変化する現象が見つかった。この共鳴周波数のシフトが核磁気共鳴スペクトルのナイトシフトで量子ホール状態の電子スピン偏極率に比例することが明らかになった。ランダウ充填率 = 1 近傍でナイトシフトを詳細に調べると、= 1 近傍における電子スピン偏極率が単純な独立電子近似の場合よりも急激に減少するという結果が得られた。このナイトシフトの減少は、= 1 近傍に電子スピンのトポロジカル励起であるスカームイオンが存在するという過去の実験・理論研究結果と整合する結果である。

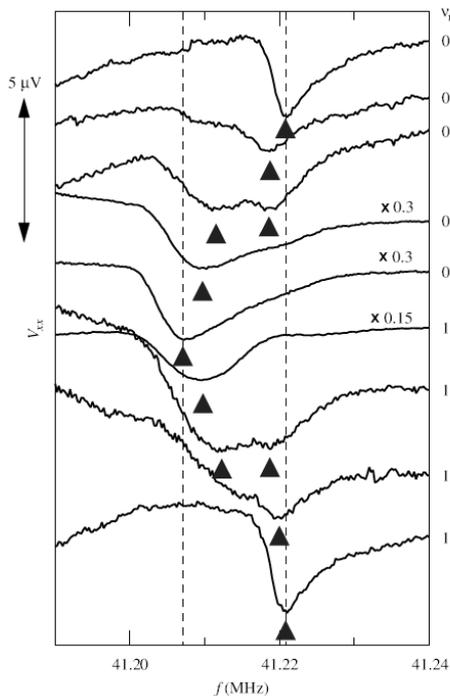


図3：核磁気共鳴スペクトルのナイトシフト。ランダウ準位充填率（右）を変化させることによって共鳴周波数が変化している。

(3) パルス交流磁場による抵抗検出型核磁気共鳴の実験では、パルスと呼ばれる、ある特徴的な幅のパルスを照射することで、核磁気共鳴信号が2倍増大することを見出した。核磁気共鳴信号のパルス幅依存性を調べることにより、核スピンのコヒーレントな振動であるラビ振動を観測した。さらに、 $\pi/2$ $\pi/2$ パルス列を用いてスピンエコー信号を測定し、エコー信号の減衰から核スピ

ンの位相緩和時間を求めることが可能になった。

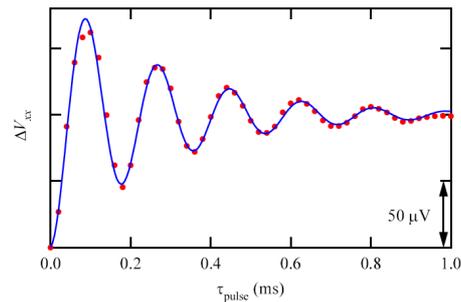


図4：核磁気共鳴信号のパルス幅依存性。核スピンのラビ振動を表している。

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4件)

M. Kawamura, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Dynamic nuclear polarization and Knight shift measurements in a breakdown regime of integer quantum Hall effect, Physica E Vol. 40, 1389 – 1391, 2008, 査読有

M. Kawamura, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya, and T. Machida, Dynamic nuclear polarization in a quantum Hall Corbino Disk, Journal of Physical Society of Japan Vol. 77, 023710 -1 – 023710 -3, 2008, 査読有

H. Takahashi, M. Kawamura, S. Masubuchi, K. Hamaya, T. Machida, Y. Hashimoto, and S. Katsumoto, Electrical coherent control of nuclear spins in a breakdown regime of quantum Hall effect, Applied Physics Letters Vol. 91, 092120 -1 – 092120 -3, 2007, 査読有

M. Kawamura, H. Takahashi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Coherent manipulation of nuclear spins in the breakdown regime of integer quantum Hall states, Journal of Physics Conference Series, 掲載確定, 査読有

〔学会発表〕(計10件)

M. Kawamura, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya, and T. Machida, Dynamic nuclear polarization and Knight shift measurements in a breakdown regime of integer quantum Hall effect, The 17th international conference on electronic properties two dimensional systems, 2007年7月17日, Genova, Italy.

M. Kawamura, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya, and T. Machida, Electrical manipulation of nuclear spins in a breakdown regime of quantum Hall effect, 15th international conference on nonequilibrium carrier dynamics in semiconductors, 2007年7月27日, Tokyo, Japan.

小野雅司, 川村稔, 高橋裕之, 橋本義昭, 勝本信吾, 浜屋宏平, 町田友樹, 量子ホール効果ブレイクダウンの動的核スピン偏極効率, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月21日, 札幌

高橋裕之, 川村稔, 小野雅司, 橋本義昭, 勝本信吾, 浜屋宏平, 町田友樹, 量子ホール効果ブレイクダウンを利用した核スピンの偏極と制御, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月21日, 札幌

川村稔, 量子ホール効果ブレイクダウンによる核スピンの電氣的制御, 望月基金記念講演会, 2008年3月22日, 吹田

川村稔, 小野雅司, 橋本義昭, 勝本信吾, 浜屋宏平, 町田友樹, 分数量子ホール効果ブレイクダウン領域における動的核スピン偏極, 日本物理学会第63回年次大会, 2008年3月23日, 東大阪

高橋裕之, 川村稔, 増淵覚, 橋本義昭, 勝本信吾, 浜屋宏平, 町田友樹, 量子ホール効果ブレイクダウンを利用した核スピンのコヒーレント制御, 第55回応用物理学関係連合講演会 2008年3月30日, 船橋.

M. Kawamura, M. Ono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Pump and probe measurements of nuclear polarization induced by breakdown of fractional quantum Hall effect, The 25th international conference on low temperature physics, 2008年8月7日, Amsterdam, the Netherlands.

M. Kawamura, H. Takahashi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, Coherent manipulation of nuclear spins in the breakdown regime

of integer quantum Hall states, The 25th international conference on low temperature physics, 2008年8月12日, Amsterdam, the Netherlands.

川村稔, 小野雅司, 橋本義昭, 勝本信吾, 町田友樹, 動的核スピン偏極による $=2/3$ 分数量子ホール状態のスピンの相転移点シフト, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 日, 盛岡.

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 稔 (KAWAMURA MINORU)

東京大学・生産技術研究所・特任助教

研究者番号: 60391926