

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390006

研究課題名(和文)量子ホール系におけるナノスケール核スピン共鳴イメージング

研究課題名(英文)Nanoscale nuclear spin resonance imaging in a quantum Hall system

研究代表者

橋本 克之 (Hashimoto, Katsushi)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：30451511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、電気抵抗測定による核スピン共鳴検出技術と局所的な核スピン共鳴技術を組み合わせることで、半導体量子構造に適した走査核スピン共鳴顕微鏡を開発した。この技術により、半導体量子構造中の核スピン共鳴強度および量子電子スピンの分布を実空間観察することが可能である。この新奇の技術を量子ホール効果ブレイクダウンに適用して測定を行った結果、電流によって励起された核スピン偏極や量子ホール電子スピン偏極が局所変化を観測することに成功した。我々の技術は、様々な量子デバイスにおけるナノスケール核スピン共鳴イメージングへの道を切り開くものである。

研究成果の概要(英文)：We established a scanning nuclear-spin resonance method suitable for semiconductor quantum systems. To achieve this goal, we combined electrical-resistive detection and local nuclear resonance utilizing scanning probe. This technique allows us local detection of both nuclear resonance intensity and Knight shift proportional to the electron spin polarization in the quantum channel of the semiconductor system. To show powerful feature of our new technique, we use quantum Hall breakdown as a model system. We have succeeded to observe local nuclear polarization and electron spin polarization. Our technique open up new avenues for nano magnetic resonance imaging of various quantum devices.

研究分野：ナノスケール量子伝導物性

キーワード：走査プローブ顕微鏡 量子ホール効果 量子ホール効果ブレイクダウン 核スピン共鳴 電子スピン

1. 研究開始当初の背景

強磁場中で二次元電子ガス(2DEG)は、磁場による閉じ込め効果から新たな量子状態を形成する。この量子状態が引き起こす量子ホール効果では、ハイパーファイン相互作用により核スピンの情報を読み出す抵抗検出核スピン共鳴技術により、国内外で、二次元電子系の量子ホール状態における特異な電子スピン状態[1]の研究が盛んに行われている。このような電子・核スピンの研究は、長い間、抵抗測定などの巨視的な手段で研究されてきたが、微視的なスピン偏極度の変化の重要性も指摘されている[2]。

しかしながら、電子・核スピンの微視的な空間変化を直接観察するためには、抵抗検出のような高感度測定に加え局所的な核スピン共鳴を行う必要がある。その手段の一つとして、走査金属プローブから交流電界を照射することで誘起する電界四重極カップリングによる核スピン共鳴が考えられる。この技術を確立するためには、量子ホール系における交流電界と核スピンのカップリングについての基礎的な知見と、走査プローブ顕微鏡による実証研究が必要である。

2. 研究の目的

走査核スピン共鳴顕微鏡を用いた、核スピン共鳴イメージング法の確立のため、(1)量子ホール系における交流電界四重極カップリングによる核スピン共鳴のスペクトラム形状を明らかにし、(2)核スピン共鳴強度イメージングによる電流励起核スピン偏極の強度分布、(3)ナイトシフトイメージングによる量子ホール電子スピン偏極の空間分布の直接観察を行う。

3. 研究の方法

試料は、バックゲートにより電子密度を制御可能な GaAs/AlGaAs 量子井戸構造を用いた。磁場 7-8 T、温度 100-300 mK で測定を行った。まず、量子ホール系における四重極カップリングの実験は、バックゲートより交流電界を照射し核スピン共鳴を起こすことで行った。また、走査核スピン共鳴イメージングは、図 1 に示すように、核スピン共鳴周波数の交流電界を金属プローブから照射することで局所核スピン共鳴を起こし、そのシグナルを抵抗検出することで行った。さらに、核スピン共鳴ピークのシフト (ナイトシ

フト) をマッピングすることで、電子スピン構造のイメージングを行った。

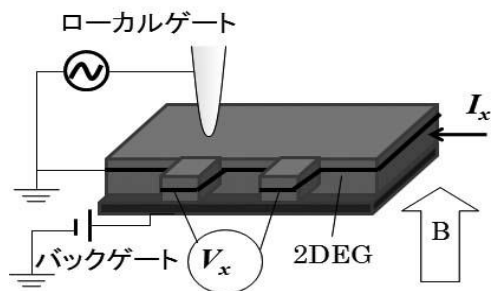


図 1 走査核スピン共鳴顕微鏡。走査プローブからの交流電界を 2DEG 内の核スピんに局所的に印可し共鳴を誘起し、同時にその共鳴シグナルを抵抗検出により観測する。

4. 研究成果

(1) 量子ホール系における電界四重極カップリング[3]

図 2 に 0.67 から 2.1 までの充填率で測定した高周波電界 (NER) による ⁷⁵As 核スピン共鳴スペクトラムと通常の高周波磁場による核スピン共鳴 (NMR) との比較を示す。NMR のスペクトラムには結晶の歪からくる静電場との四重極カップリングにより四重極分離が生じており、三つのピークが現れている。一方で、NER スペクトラムには 2 つのピークのみ現れている。これに加え、NER では、NMR では現れない、基本共鳴周波数の二倍の周波数における共鳴も生じることが分かった。これらの特徴は、電界四重極カップリングによる核スピン共鳴の特徴に合致する。また、充填率依存性を見ると、NER でも NMR と同様に量子ホール電子スピン偏極度に依存したピークのシフトが現れている。これは、NER でも電子スピン状態を反映したナイトシフトが得られることを意味している。

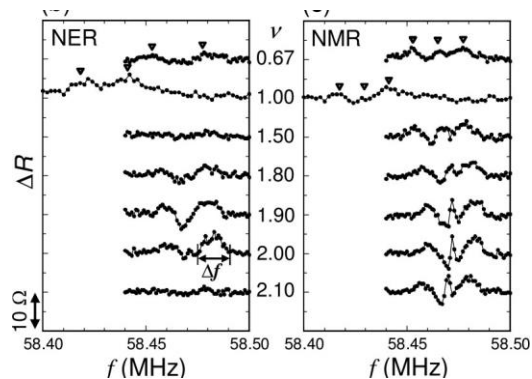


図 2 高周波電界 (左、NER) と高周波磁場 (右、NMR) による ⁷⁵As 核スピン共鳴スペクトラムの充填率依存性の比較。

(2) 電流励起核スピン偏極の分布

走査核スピン共鳴顕微鏡を用いて、ホールバーの外側[図3(a)A点]と内側[図3(a)B点]で局所核スピン共鳴測定を行った[4]。図3(b)に示した ^{75}As 核スピン共鳴基本周波数(f_{As})のスペクトラムを見ると、電流励起により核スピンが励起されているホールバー内ではホールバー外より強度が大きいスペクトラムが得られている。一方でホールバー外でも有限のバックグラウンドが生じている。このバックグラウンドは、倍周波 $2f_{\text{As}}$ のスペクトラムで抑制されることが分かった[図3(c)]。したがって、 $2f_{\text{As}}$ スペクトラムの方がより局所的な情報を反映しており、走査プローブを用いたイメージングに適していると考えられる。

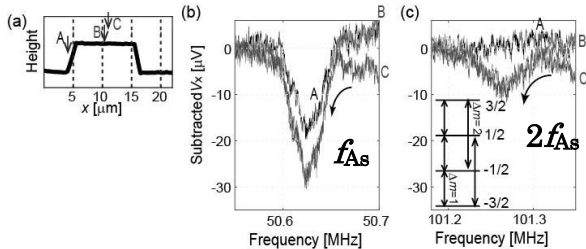


図3 局所核スピン共鳴測定。(a)原子間力顕微鏡によるホールバーの断面ラインプロファイル。(b) ^{75}As 核スピン共鳴基本周波数(f_{As})のスペクトラム。(c)二倍周波数($2f_{\text{As}}$)のスペクトラム。挿入図：核スピンエネルギーレベルにおける、 f_{As} 、($2f_{\text{As}}$)共鳴に対応する1量子(2量子)遷移。

次に電流励起核スピン偏極の空間分布を特定するため、 $2f_{\text{As}}$ 局所核スピン共鳴のスペクトラム強度マッピングを行った。 $\nu = 1.0$ 付近ではホールバーのバルク領域に広がるパターンが得られた。このパターンは充填率を大きくすることで変化し、 $\nu = 1.1$ では低ホール電圧側のホールバーエッジに沿った直線状のパターンが現れた。これは、量子ホール系の非圧縮性領域の位置の変化[5]と合致する。したがって、非圧縮性領域のランダウレベル間散乱に伴う電流励起核スピン偏極の領域を示していると考えられる。

(3) ナイトシフトマッピングによる電子偏極度イメージング

核スピンを取り巻く電子スピンの偏極度により、核スピン共鳴スペクトラムピークの周波数位置がずれるナイトシフトを利用し電子の偏極度マッピングを行った。図4に、

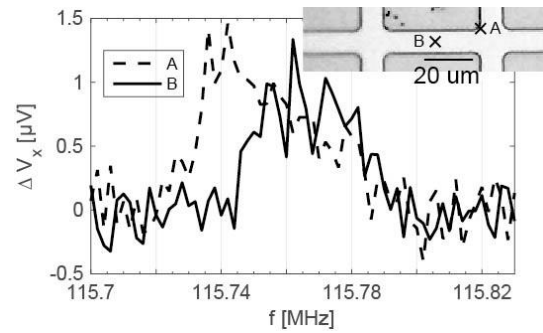


図4 局所核スピン共鳴スペクトルによるナイトシフトの空間変化。点線(実線)は挿入図の光学顕微鏡写真のホールバーのA点(B点)で得られたスペクトル。電子のドリフト方向は右から左。

電子の注入口に近いA点と $20\ \mu\text{m}$ 離れたB点(図4挿入図)で得られた局所核スピン共鳴スペクトラムを示す。A点でのスペクトラムに対し、B点でのスペクトラムが高周波側にシフトしナイトシフトが小さくなっている。これは、電子が $20\ \mu\text{m}$ ドリフトする間に、電子スピン偏極が約20パーセント減少していることを意味している。このナイトシフト測定をA、B両点を含む $12\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ の範囲で行い得られた電子スピン偏極度の二次元イメージより、A点付近が最も大きな電子スピン偏極率を持つことが分かった。

同様に、二次元イメージの電流依存性を調べた結果、量子ホール効果ブレークダウン臨界電流近傍 $I = 1.4\ \mu\text{m}$ では電子偏極度の空間変化は小さくほぼ一定であるが、 $I = 2.6\ \mu\text{m}$ まで電流を大きくすることで、顕著な空間変化が生じることを見出した。この空間変化は、量子ホールブレークダウンのメカニズムの一つであるブートストラップメカニズム(電子が電界で加速されるために生じる雪崩式電子励起)により電子温度が空間的に上昇したためであると考えられる。この結果は、量子ホールブレークダウンの電子スピン状態の空間分布分を初めて可視化したものであり、量子ホールブレークダウンの微視的なメカニズムの解明につながると考えられる。また、走査核スピン共鳴顕微鏡が、他の量子ホール電子スピン偏極度の空間分布を測定するための強力なツールとなりうることが証明された。これらの結果は、2016年8月に中国の北京で行われた半導体物性の代表的な国際会議 International Conference on the Physics of Semiconductors (Hashimoto et al., ICPS2016, Beijing, China)でも高く評価され、招待講演に採択された。

参考文献

- [1] L. Tiemann, G. Gamez, N. Kumada, K. Muraki, *Science*, **335**, 828 (2012).
- [2] L. Tiemann, T.D. Rhone, N. Shibata, K. Muraki, *Nature Physics*, **10**, 648 (2014).
- [3] T. Tomimatsu, S. Shirai, K. Hashimoto, K. Sato, and Y. Hirayama., *AIP Advances* **5**, 087156 (2015).
- [4] K. Hashimoto, T. Tomimatsu, S. Shirai, S. Taninaka, K. Nagase, K. Sato, and Y. Hirayama, *AIP Advances* **6**, 075024 (2016).
- [5] K. Panos, R. R. Gerhardt, J. Weis, and K. von Klitzing, *New J. Phys.* **16**, 113071 (2014).

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 “Scanning nuclear electric resonance microscopy using quantum-Hall-effect breakdown”, K. Hashimoto, T. Tomimatsu, S. Shirai, S. Taninaka, K. Nagase, K. Sato, and Y. Hirayama, *AIP Advances* **6**, 075024 (2016). (査読あり)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4960430>

② “Comparison of nuclear electric resonance and nuclear magnetic resonance in integer and fractional quantum Hall states”, T. Tomimatsu, S. Shirai, K. Hashimoto, K. Sato, and Y. Hirayama., *AIP Advances* **5**, 087156-1-6 (2015). (査読あり)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4929477>

③ “Atomic force microscope-assisted scanning tunneling spectroscopy under ambient conditions”, A. Vakhshouri, K. Hashimoto, and Y. Hirayama, *Microscopy* **63**, 475-479, (2014). (査読あり)
<https://doi.org/10.1093/jmicro/dfu028>

[学会発表] (計 12 件)

① K. Hashimoto, “Scanning nuclear resonance imaging on a hyperfine-coupled quantum Hall system”, Regensburg-Tohoku Workshop on Solid-State Physics and Spintronics, 2017年03月28日-30日、ルーセントタカミヤ (山形県山形市)

② K. Hashimoto et al., “Scanning gate imaging of quantum Hall hyperfine-coupled system”, 新学術領域「ハイブリッド量子科

学」第四回領域会議2017年2月27-3月1日、理化学研究所 (埼玉県、和光市)

③ 橋本克之、「走査核スピン共鳴顕微鏡」、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会、2017年2月24日、東北大学・片平キャンパス (宮城県仙台市)

④ K. Hashimoto et al., “Electrically detected nuclear spin resonance microscopy”, 6th Summer School on Semiconductor/Superconducting Quantum Coherence Effects and Quantum Information, September 21-23, 2016, ホテルサンバレー那須 (栃木県那須郡)

⑤ 橋本克之、「2倍共鳴周波数による核スピン共鳴マッピング」、日本物理学会 2015年秋季大会、2016年9月13-16日、金沢大学・春日井キャンパス (愛知県春日井市)

⑥ 招待講演 K. Hashimoto et al., “Scanning nuclear electric resonance microscopy in a quantum Hall system”, The 33rd International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2016), July 31 - August 5, 2016, Beijing, China.

⑦ 橋本克之、「抵抗検出核スピン共鳴顕微鏡による核・電子スピンマッピング」新学術領域「ハイブリッド量子科学」第三回領域会議2015年8月25-26日、東京理科大学(東京都、新宿区)

⑧ K. Hashimoto et al., “Real-Space Mapping of Nuclear Spin Resonance in a Quantum Hall System” EP2DS/MSS, July 27-31, 2015, 仙台国際センター (宮城県仙台市)

⑨ 招待講演 K. Hashimoto et al., “Real-space observation of nuclear spin polarization in a quantum Hall System”, International Symposium on Quantum System and Nuclear Spin Related Phenomena (QSNS), February 18 - 20, 2015, Miyagi, Japan

⑩ K. Hashimoto et al., “Nuclear spin resonance imaging”, 4th Summer School on Semiconductor/Superconducting Quantum Coherence Effects and Quantum Information, September 11-13, 2014, ホテルサンバレー那須 (栃木県那須郡)

⑪ 橋本克之、「広範囲な充填率での交流電場

核スピン共鳴測定」、日本物理学会 2014 年
秋季大会、2014 年 9 月 7-10 日、中部大学・
春日井キャンパス（愛知県春日井市）

⑫ K. Hashimoto, “Real-space imaging of
nuclear spin resonance in quantum Hall
effect breakdown”, The 21st
International Conference on High Magnetic
Fields in Semiconductor Physics
August 3-8, 2014, Panama City, USA

[その他]

ホームページ等

<http://quant-trans.org/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 克之 (HASHIMOTO, Katsushi)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：30451511

(2) 研究分担者

研究者番号：

(3) 連携研究者

富松 透 (TOMIMATSU, Toru)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：60712396

(4) 研究協力者