

## 研究課題別評価

### 1 研究課題名:

量子ホール系における核磁気共鳴を利用した固体量子ビット素子の開発

### 2 研究者氏名:

町田友樹

### 3 研究のねらい:

量子状態のコヒーレント制御は量子情報技術の実現に向けた第一歩であり、その重要性が急速に高まっている。静磁場中の原子核スピンは上向きスピン状態と下向きスピン状態とからなる2準位系を形成し、その位相緩和時間が極めて長いため応用上理想的な系である。実際、溶液中分子の核スピン制御により、現時点で最大ビット数の量子計算（7量子ビット）が実現されている。従って、固体素子中の核スピンを利用することにより、量子情報技術開発において幅広い応用可能性が拓けることは明らかである。ところが固体素子中の核スピン制御は容易でなく、標準的なピックアップコイルを用いた核磁気共鳴技術や既存の円偏光レーザービームによる核磁気共鳴技術では、固体素子中における局所領域核スピンのコヒーレント制御が困難である。

そこで本研究では、強磁場中二次元電子系で実現される量子ホール端状態を利用して核スピンを局所的かつコヒーレントに電気的手法で制御する。量子ホール端状態における電子スピン-核スピン間超微細相互作用を利用して核スピンを動的に偏極し（初期化）、素子上に作製した微小コイルにより高周波磁場を印加して量子状態をコヒーレントに制御し、操作後の核スピン状態をホール抵抗値をプローブとして検出する。本研究では、量子ホール端状態における電子スピン-核スピン相互作用に関する基礎物性の研究を行い、そこで得られた知見を基礎として、固体中核スピン量子ビット素子を開発することが目的である。また逆に、核スピン偏極をプローブとして利用することにより、量子ホール系の基礎的な電子スピン物性探求も行う。本研究で固体量子ビット素子開発を試みることにより、将来の量子情報技術開発に向けた重要な基礎を築き、基礎物性物理・素子応用の両面において幅広い可能性を拓く。

### 4 研究成果:

#### 1. 量子ホール端状態を利用した動的核スピン偏極

固体中核スピン量子ビット素子への応用に向けて、核スピン量子状態の初期化は極めて重要な過程である。本研究では、量子ホール端状態における電子スピン-核スピン間超微細相互作用を利用して核スピンを初期化する。量子ホール端状態において、伝導電子のスピンと半導体材料の核スピンは超微細相互作用により結合しており、電子スピンと核スピンの間にはフリップ・フロップ的な散乱過程が生じる。 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ ヘテロ構造から作製したホールバー素子を用いて、量子ホール端状態間散乱を利用して電子スピンを選択的に反転させると、それに応じて核スピンが反転し、動的核スピン偏極が生じる。動的核スピン偏極は電子スピンのゼーマン分離を実効的に拡大または縮小するため、端状態間散乱の抑制/促進に伴うホール抵抗値の増大/減少として高感度に検出することができる。

本初期化手法では、端状態近傍の核スピンのみが選択的に偏極されるが、その空間的な広がりについては情報が全く得られていなかった。そこで、素子に作製したサイドゲートを利用して量子ホール端状態の位置を制御することにより、核スピンの「偏極&検出」実験を行い、動的核スピン偏極の空間分布を実験的に決定した。動的核スピン偏極に起因するホール抵抗値変化の空間分布が明瞭に観測され、核スピンが幅30nm程度の領域で局所的に偏極していることが実験的に示された。さらに、動的核スピン偏極の形成および緩和過程における核スピン偏極の空間分布測定を行い、GaAsでは全ての元素が核スピンモーメントを持つため核スピン拡散が顕著である可能性があるものの、核スピン偏極領域の顕著な広がり観測

されず、核スピン拡散の効果が小さいことが示された。また、任意の位置に任意の数の核スピン偏極領域を形成できることを実験的に示し、上記の手法を発展させることにより、半導体素子中の任意の位置に任意の形状の核スピン偏極領域を形成することが可能であることを示した。

量子ビット素子への応用に向けて、核スピン量子状態の初期化は極めて重要な過程の1つであり、物理的な初期化手法により高い初期化率を実現することが必要不可欠である。そこで、本手法による核スピンの初期化率を(a)傾斜磁場の利用によるゼーマン分離の拡大、(b)ホール抵抗値の非線形性におけるヒステリシスの観測、という2つの方法で決定した。核スピン偏極率は二次元電子系の移動度に大きく依存するが、実験で得られた偏極率は25-50%である。素子形状の設計を工夫することで、偏極率はさらに向上可能である。

## 2. 局所的核磁気共鳴による核スピン制御

本研究では、素子上に作製した微小コイルにより高周波磁場を印加して核磁気共鳴を引き起こし、核スピン量子状態を制御する。核スピン量子状態を初期化した後、微小コイルに高周波電流をパルス的に印加すると重ね合わせ状態の確率振幅はパルス磁場の印加により振動的に変化する。パルス操作後のホール抵抗値を測定することにより、上向きスピン状態と下向きスピン状態の間で量子状態がコヒーレントに振動するラビ振動がホール抵抗値の振動として観測される。従って、高周波磁場のパルス幅を選択することにより  $|0\rangle$  状態と  $|1\rangle$  状態の任意の重ね合わせ状態を実現でき、 $10^9$  程度の核スピンをアンサンブルとしてコヒーレントに制御し、量子ビットなどの量子情報技術へ応用できることを示している。

量子ビット素子実現に向けては、ラビ振動の減衰時間および核スピン緩和時間は重要な物理量である。本研究では通常の核磁気共鳴において使用するピックアップコイルではなく、素子上に作製した局所コイル構造を用いて高周波磁場を印加しているため、高周波磁場の不均一によりラビ振動の周期が不均一になることでラビ振動が減衰する可能性がある。そこで、高周波磁場の空間分布を有限要素法により数値計算し、ラビ振動の減衰における高周波磁場不均一の影響を検討するとともに素子設計の指針を得た。現在の素子構造では、ラビ振動の振幅は理想的な場合に比べて 80%程度になるが、振動の減衰に対してはほとんど影響がない。

量子ビットは量子力学的な2準位系の量子状態の重ね合わせとして記述されるが、量子ビット操作においては位相項を制御して、任意の軸回りの回転ゲート操作を実現する必要がある。そこで本研究では、位相まで制御した核磁気共鳴手法を抵抗検出型核磁気共鳴において実現し、量子状態の位相制御を行った。位相の違いに応じて核磁気共鳴によるホール抵抗値変化が系統的に変化する様子が観測され、抵抗検出型核磁気共鳴においても位相まで含めた核スピン制御が可能であり、回転ゲート操作が実現できることを示した。

量子ビット操作実現に向けて、核スピン緩和時間は極めて重要な物理量であり、縦緩和と横緩和の2つの成分がある。縦緩和時間  $T_1$  を決定するため、核スピン偏極が初期化後、熱平衡分布へ緩和する時間をホール抵抗値をプローブとして測定した。実験により得られた縦緩和時間  $T_1$  は 550 秒である。

核スピン緩和過程において、量子状態コヒーレンスの観点からは、核スピンの横緩和過程が重要である。本質的な位相緩和時間  $T_2$  と非本質的な効果による  $T_2'$  (不均一幅) の寄与の和である  $T_2^*$  ( $1/T_2^* = 1/T_2 + 1/T_2'$ ) を決定するために、量子ホール端状態を用いた抵抗検出型のFID法を行った。量子ホール端状態を利用した抵抗検出型核磁気共鳴によってもFID信号の減衰がホール抵抗値により観測され、 $T_2^* = 25 \mu\text{s}$  が得られた。

量子状態コヒーレンス時間に相当する  $T_2$  を決定するために、量子ホール端状態を用いた抵抗検出型のスピンエコー実験を行った。収束効果による核スピンエコー信号をホール抵抗値により観測した。その減衰は本質的なコヒーレンス時間  $T_2$  を与え、エコー信号の減衰より  $T_2 = 160 \mu\text{s}$  が得られた。抵抗検出型核磁気共鳴においても、一般的なピックアップコイルによる核磁気共鳴と同様に、FID法及びスピンエコー法の技術が実現できるということは、量子ホール系を利用した本手法でも、一般的な核磁気共鳴で実現可能な技術は全て移植

可能であることを示している。

GaAsに含まれる元素 $^{69}\text{Ga}$ 、 $^{71}\text{Ga}$ 、 $^{75}\text{As}$ はいずれも核スピンモーメント  $3/2$  の系であるため、実際には2準位系ではなく、4準位系を形成する。その4準位系を選択的に制御することができれば、2量子ビットの量子サーチアルゴリズムの実現が可能である。実際に高移動度二次元電子系を持つヘテロ構造から作製した素子において、 $^{69}\text{Ga}$ 、 $^{71}\text{Ga}$ 、 $^{75}\text{As}$ に対する抵抗検出型核磁気共鳴スペクトルで核磁気共鳴ピークが3つに分裂する様子が明瞭に観測された。さらに核磁気共鳴周波数の倍の周波数において、2つに分裂した核磁気共鳴ピークが観測された。これは通常の核磁気共鳴では禁制遷移である2量子遷移に相当する。従って、4準位系の量子状態を選択的に制御することが可能であり、原理的には2量子ビットの量子サーチアルゴリズムが実現可能であることを実験的に示したことになる。

### 3. コヒーレント時間の延長と量子ホール系のスピン物性探求に向けて

核スピン量子状態の最も主要なデコヒーレンス要因は、電子系との相互作用に起因すると考えられる。そこで、高周波磁場印加（量子状態の制御）過程において、サイドゲートに負の電圧を印加して核スピンと電子系との相互作用を排除して高周波磁場を印加する方法により、抵抗検出型核磁気共鳴の測定を行った。核スピンと電子系の相互作用を排除した場合と排除しない場合に得られた抵抗検出型核磁気共鳴スペクトルにおいて、ナイトシフトが明瞭に観測されるとともに、核磁気共鳴スペクトルの線幅が減少した。これは核スピンと電子スピン系との相互作用がなくなるため、核スピンのコヒーレント時間が延長されたためである。この手法により量子ホール素子における核スピンのコヒーレント時間を意図的に延長することが可能であるとともに、この手法を応用することで、逆に、電子系の電子スピン物性についての情報を得ることも可能である。つまりナイトシフトは電子スピン偏極率を実験的に決定する最も直接的な手法であり、量子ホール端状態を利用した抵抗検出型核磁気共鳴の利用により、端状態電子系における局所的な電子スピン偏極率を決定することができる。

量子ビット素子への応用においては、核スピン量子状態のコヒーレント時間の延長は最重要課題の1つである。そこで、Si/SiGeヘテロ構造から作製した量子ホール素子において $^{29}\text{Si}$ 核スピンを制御することを目的に、量子ホール端状態間非平衡分布の観測を行った。シリコンは $^{28}\text{Si}$ (92.2%)、 $^{29}\text{Si}$ (4.7%)、 $^{30}\text{Si}$ (2.2%)の同位体から構成されており、核スピンを持つのは $^{29}\text{Si}$ のみであるため核スピン間相互作用による位相緩和、スピン拡散が抑制され、室温でも25s以上という位相緩和時間を持つことが示されている。 $^{29}\text{Si}$ 核スピン制御への第一段階として、Si/SiGeヘテロ構造より作製した量子ホール素子において、量子ホール端状態間非平衡分布の観測を行った。Si系二次元電子系においても量子ホール端状態非平衡分布の形成および検出が可能であることを示すとともに、ランダウ準位交差の前後において、端状態間散乱頻度が大きく変化する様子が観測され、端状態散乱の抑制においては電子スピン反転が極めて大きな役割を果たしていることを示した。従って、量子ホール端状態を利用した核スピン制御手法により $^{29}\text{Si}$ 核スピンを制御することで、コヒーレント時間が秒のスケールに及ぶ固体中核スピン量子ビット素子の実現が期待できる。

### 5 自己評価:

量子ホール系における抵抗検出型核磁気共鳴を利用した固体量子ビット素子の開発と基礎物性の探求に関して研究を進めた。多量子ビット操作の実現には至らなかったが、今後の量子ビット素子開発に向けた、基礎的な情報を多く得ることができた。具体的には動的核スピン偏極の空間分布や初期化率、制御プロセスにおけるコヒーレント時間などの実験的な情報である。また、Si系二次元電子系への展開に着手し、量子ホール端状態間非平衡分布が観測されたため、Siという工学応用における中心的な半導体材料において、核スピンを制御することでコヒーレント時間が秒のスケールに及ぶ半導体量子情報素子を実現できる可能性があり、今後の研究につなげたい。また、量子情報技術への応用については、核スピンアンサンブルのエンタングルメント状態制御が重要となると考えられ、今後の研究で実現したい。また、本研究で得られた成果のいくつかは、今後の量子ホール系基礎物性の探求にむ

けた強力な実験技術となりうる。これまでの研究を基礎・応用の両面で大きく発展させていきたい。

#### 6 研究総括の見解:

量子情報処理を実現するため種々の物理現象の探索が精力的に続けられているが、外界との相互作用が弱い核スピンはコヒーレンス緩和時間が長い利点を持つ。制御性の観点から固体中の核スピんに注目し、化合物半導体中の量子ホール素子において電子スピン-核スピン間超微細相互作用を介した核スピンの電氣的制御を行った。

主要な研究成果として次の3点を挙げる事ができる。第1にAlGaAs/GaAsヘテロ構造ホール効果素子にサイドゲート電極を設けて量子ホール端状態を制御し、核スピンの偏極・検出実験を行い、50%程度の核スピン初期化率を実現できることを示した事;第2に局所核磁気共鳴により位相緩和時間 $T_2^*$ 、 $T_2$ を決定した事;第3にサイドゲート電圧の調節によって核スピンと電子スピンの結合の強さを制御できることを見出した事、である。また、新しい材料としてSi/SiGeホール素子を作成し、より長い時定数の量子端効果を確認している。

これらの研究成果は5篇の英文原著論文、4篇の解説論文および国内外での7件の招待講演等で公表している。全体としてほぼ予想の程度の成果が達成されたと判断する。

#### 7 主な論文等:

論文 5件

- [1] T. Machida, T. Yamazaki, K. Ikushima, and S. Komiyama, "Coherent control of nuclear-spin system in a quantum-Hall device", Appl. Phys. Lett. **82**, 409-411 (2003).
- [2] T. Machida, T. Yamazaki, K. Ikushima, and S. Komiyama, "Local control of nuclear-spin system in a quantum-Hall device", Superlattices and Microstructures **32/4-6**, 275-282 (2003).
- [3] T. Machida, T. Yamazaki, K. Ikushima, and S. Komiyama, "Electrical manipulation of nuclear spins in quantum Hall devices", Physica E **21**, 921-927 (2004).
- [4] T. Machida, T. Yamazaki, K. Ikushima, and S. Komiyama, "Coherent electrical manipulation of nuclear spins in semiconductors", Physica E **25**, 142-149 (2004).
- [5] K. Hamaya, S. Masubuchi, K. Hirakawa, S. Ishida, Y. Arakawa, K. Sawano, Y. Shiraki, and T. Machida, "Spin-dependent edge-channel transport in a Si/SiGe quantum Hall system", Phys. Rev. B **73**, 121304 (2006).

特許 1件

- [1] 発明者: 町田友樹  
発明の名称: 量子演算素子  
出願人: 科学技術振興機構  
公開番号(公開日): 特開 2004-304004 (2004年10月28日)

招待講演 7件

- [1] T. Machida, "Electrical manipulation of nuclear spins", The 11th International conference on Modulated Semiconductor Structures, Nara, 2003.
- [2] T. Machida, "Electrical coherent manipulation of nuclear spins in semiconductors", International Conference and School "Semiconductor Spintronics and Quantum Information technology", Brugge, 2003.
- [3] T. Machida, "Coherent manipulation of nuclear spins in semiconductors", International Symposium on "Photonics and Spintronics in Semiconductor Nanostructures", Kyoto, 2003.
- [4] T. Machida, "Coherent electrical manipulation of nuclear spins in semiconductors", 13th International Winterschool on New Developments in Solid State Physics, Austria, February

2004.

- [5] T. Machida, “Coherent control of nuclear spins in a quantum-Hall device”, The American Physical Society March Meeting, Montreal, 2004.

他