

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

町田友樹

東京大学 生産技術研究所

1. 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ことため応用上理想的な系である。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な手法で制御する。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。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。

2. 研究成果と考察

(1) 量子ホール端状態を利用した動的核スピン偏極

$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ ヘテロ構造から作製したホールバー素子において、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の偏極・検出を行う。量子状態の初期化は量子ビット操作において重要な過程であり、本研究では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」実験を行った。核スピンは端状態近傍の幅 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 (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、を利用する2つの独立した手法により核スピン偏極率を実験的に決定し、50%程度の核スピン初期化率が実現されていることを確認した。

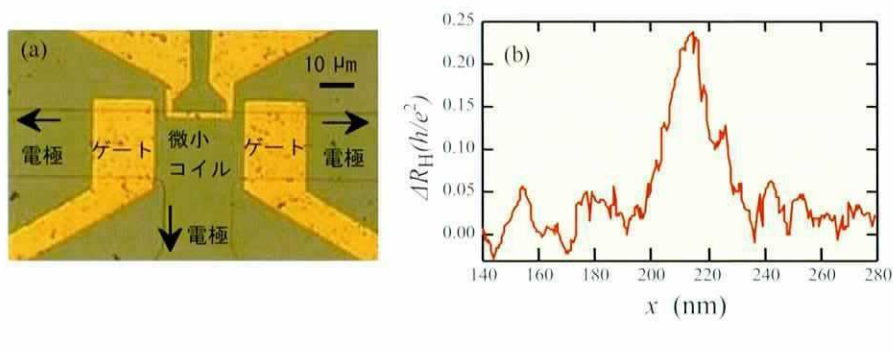


図1:(a)半導体 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ ヘテロ構造より作製した量子ホール素子。(b)核スピンの偏極&検出実験において得られたホール抵抗値変化の空間分布。

(2) 局所的核磁気共鳴による核スピンのコヒーレント制御

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。高周波磁場のパルス幅を変化させることにより、核スピンラビ振動が検出される。本研究では量子ビット素子への応用に向けて、核スピンの位相制御、FID 方およびスピン

エコー法によるコヒーレント時間の決定を行った。抵抗検出型核磁気共鳴により、FID 法およびスピンエコー法を実現し、位相緩和時間を $T_2^* = 25 \mu\text{s}$ 、 $T_2 = 160 \mu\text{s}$ と決定した。一般に固体中の量子状態のコヒーレンス時間がピコ秒ないしナノ秒のオーダーであるが、核スピンの利用により数桁長いコヒーレンス時間が実現されている。

また、多量子ビット操作の実現に向けて、GaAs 核スピンの形成する4準位系の選択的なコヒーレント制御を試みた。 ^{69}Ga 、 ^{71}Ga 、 ^{75}As の3種類の元素を独立に制御することにより、それぞれの核スピンラビ振動を観測した。さらに、抵抗検出型核磁気共鳴スペクトルにおいて、電気四重極相互作用によるスペクトル分離が観測され、各遷移を独立に制御できることを示した。

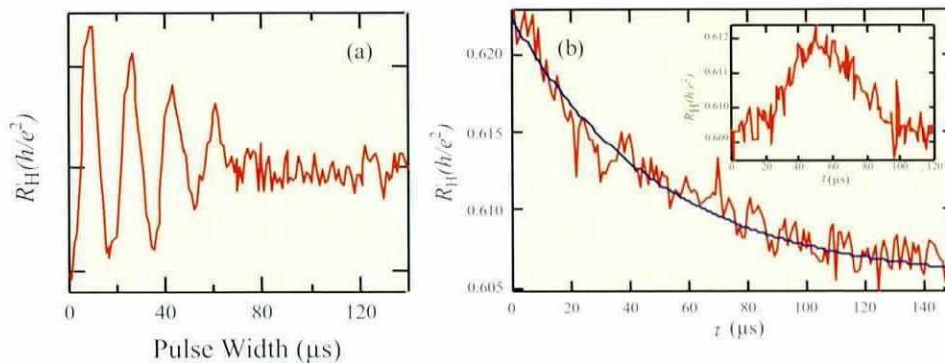


図2:(a)高周波磁場の印加によるホール抵抗値変化のパルス幅依存性。核スピン量子状態のコヒーレントな時間発展(ラビ振動)に相当。(b)ホール抵抗値により検出したスピンエコー信号とその減衰

(3) 核スピンコヒーレント時間の延長とナイトシフト観測

電子系との相互作用に起因している核スピン量子状態のデコヒーレンス要因を排除するため、高周波磁場印加(量子状態の制御)過程において、サイドゲートの利用により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手法により、抵抗検出型核磁気共鳴の測定を行った。ナイトシフトが明瞭に観測されるとともに、核スピンのコヒーレント時間の延長を反映して核磁気共鳴スペクトルの線幅が減少した。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、この手法の応用により電子系の局所的なスピン偏極率を決定することが可能になり、スピン物性探求における強力なツールとなる。

3. 主要な研究成果

論文 4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, "Coherent electrical manipulation of nuclear spins in semiconductors", Physica E 25, 142-149 (2004).

特許 1件

- [1] 町田友樹、量子演算素子、特開 2004-304004

国際会議発表 9件(招待講演 6件)

国内会議発表 7件(招待講演 3件)

解説等 4件