

研究報告書

「抵抗検出型核磁気共鳴による電子スピン偏極測定法の開発」

研究期間：平成20年10月～平成24年3月

研究者：川村 稔

1. 研究のねらい

近年目覚ましい発展を遂げているスピントロニクス分野では、電子のスピン自由度を利用し、従来の半導体エレクトロニクスでは実現できなかった機能や性能を持つデバイスが実現されている。これらのスピンドバイスの性能を高めていくためには、半導体界面の伝導チャンネルにおける電子スピンドイナミクス・電子スピン空間分布を理解することが重要となる。ところが、半導体界面では電子スピン数が少ないため、バルク物質のスピン物性測定に用いられる実験手法をそのまま適用することができず、半導体界面のスピン物性にはまだ解明されていない部分が多く残されている。走査型プローブ顕微鏡を応用した最新の実験手法でも界面の電子スピンだけを選択的に検出することは難しく、界面スピン物性探索にはあまり応用されていない。本研究のねらいは、半導体界面の電子スピン偏極状態を調べる新しい測定手法を確立することである。抵抗検出型核磁気共鳴を利用して、界面の電子スピン状態を選択的に検出し、電子スピンのダイナミクス・空間分布を調べる測定手法を確立する。

2. 研究成果

(1) 核スピン偏極度の空間分布測定

抵抗検出型核磁気共鳴をおこなうために、半導体界面の核スピンを動的に偏極する必要がある。量子ホール効果を電流印加によって崩壊させることで、GaAs/AlGaAs 半導体界面に存在する核スピンを動的に偏極させる。量子ホール効果崩壊はランダウ準位間の電子-電子衝突励起によって引き起こされる。我々はこれまで、この衝突励起が核スピン偏極の直接的原因であると主張してきたが実験証拠は得られていなかった。量子ホール効果崩壊では衝突励起が電子の流れに沿って雪崩的に生じるため、核スピン偏極の原因が衝突励起であれば、量子ホール効果崩壊によって生じた核スピン偏極も電子流に沿った空間分布を有することが予想される。これを実証するためにホール電圧測定をおこない、核スピン偏極にともなうホール電圧変化の検出を試みた。

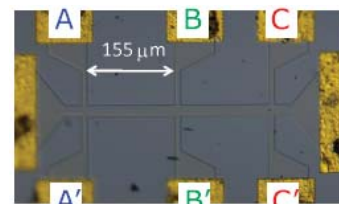


図1: 測定した多端子ホールバー素子

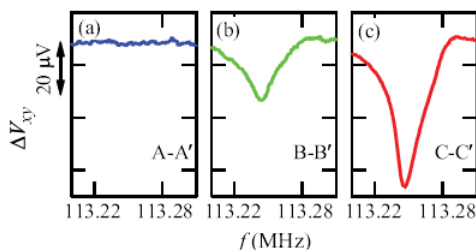


図2: ホール電圧測定によって得られた核磁気共鳴スペクトル。

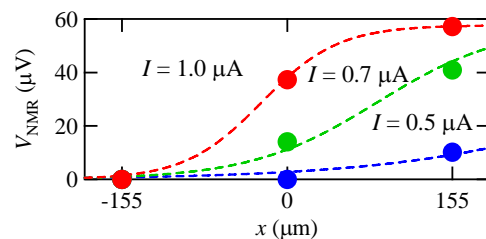


図3: 核磁気共鳴スペクトル強度の空間依存性。

ホール電圧測定では、ホール電圧プローブと電流路の交差点の情報が得られる。したがって、図1のような多端子ホールバー素子を用いれば、A, B, Cの3交差点からの核磁気共鳴信号を比較することができる。長さ300ミクロンのホールバー素子を1.5ケルビンに冷却して実験をおこない、核磁気共鳴スペクトル強度がホール電圧プローブの位置に依存することを見出した(図2)。得られたスペクトル強度の空間分布は、測定する電流極性反転によって反転し、空間分布の特徴的長さは電流および磁場の大きさによっても変化する。これらの実験結果は、核スピン偏極が電子流に沿った空間分布を有することを示しており、核スピン偏極がランダウ準位間衝突励起によって雪崩的に引き起こされること強く示唆する。またこの実験結果からホール電圧測定がホールバー素子内部での核磁気共鳴信号の空間分布を調べる有効な手段であることが分かった。

(2)電子スピン偏極率の空間分布

核磁気共鳴周波数は電子スピンの作る有効磁場によって変化する。したがって、核磁気共鳴スペクトル形状の解析から、電子スピン偏極率 P_e を得ることができる。ランダウ準位充填率 $\nu = 1$ の量子ホール系では電子スピンは完全偏極しているが、量子ホール効果が崩壊すると電子スピン偏極率は大きく減少することが期待される。電子系に流す電流量を変化させ、核磁気共鳴スペクトルの変化を調べた(図4)。量子ホール効果崩壊が生じる臨界電流値の2倍以上の電流を印加すると、核磁気共鳴スペクトルのピーク周波数が高周波数側へシフトし始めることが分かった。ピーク周波数のシフトから電流印加時の電子スピン偏極率を定量的に決定した(図5)。この実験では、量子ホール効果崩壊にともなう急峻な電子スピン偏極率変化を捉えることを目指したが、周波数シフトが始まる電流値が量子ホール効果崩壊の臨界電流値よりもかなり大きな値であり、量子ホール効果崩壊にともなう電子スピン偏極率の変化は捉えられていない。これは量子ホール効果崩壊に關与する電子スピン数がスペクトル形状の変化をもたらすほど多くなかったためと考えられる。量子ホール効果崩壊にともなう電子スピン偏極率の変化を捉えるには、より線幅の狭い共鳴線を用いて周波数分解能を高めた実験を行う必要がある。電気四重極分裂を用いて実効的なスペクトル線幅を狭くする方法が有効であると考えている。またこの実験では、大電流領域でのスペクトル形状が空間的に一様な電子スピン偏極を仮定したモデルと合致しないことが明らかになった(図4, $I = 3.0 \mu\text{A}$)。ホール電圧測定によって得られた核磁気共鳴スペクトルでもホール電圧プローブの位置によってスペクトル形状が変化するという結果を得ている。これらの結果は、大電流領域において電子スピン偏極が空間分布していることを示唆しており、スピン反転をともなった電子励起が空間的に非一様に起きていると解釈できる。

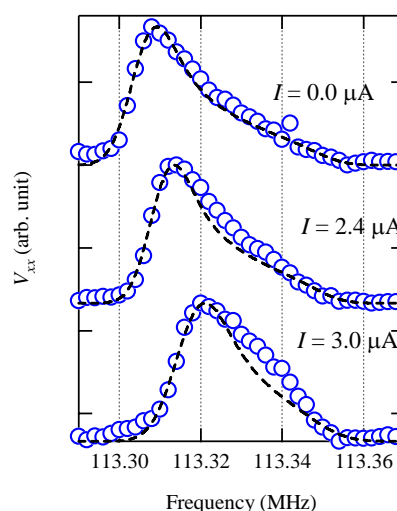


図4: 電流印加による核磁気共鳴スペクトルの変化。

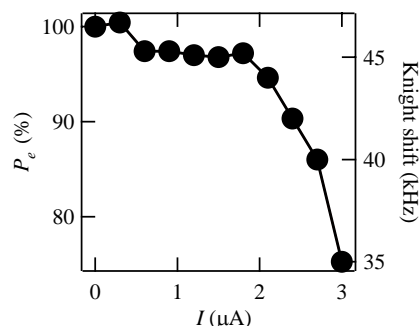


図5: 電子スピン偏極率の電流依存性

(3)新しい核磁気共鳴検出手法の開発

量子ホール効果崩壊を用いた動的核スピン偏極・検出手法では、電子のサイクロトロン運動の量子化を利用しているため、この手法を適用できる材料系が限定される。サイクロトロン運動を利用せずに核スピンを制御できれば、抵抗検出型核磁気共鳴の応用範囲も広がると考え、サイクロトロン運動を利用せずに核スピンを電氣的に偏極・検出する実験手法を新たに開発した。実験には GaAs/AlGaAs 半導体界面の2次元電子系を静電ポテンシャルによって狭窄した量子ポイントコンタクト素子を用いた。磁場中において、静電ポテンシャルを変化させポイントコンタクトの伝導チャネルを狭めていくと、閉塞する直前で核スピスが動的に偏極することを見出した。核スピン偏極による有効磁場の微小変化を量子ポイントコンタクト素子の電気伝導度測定によって検出し、核磁気共鳴スペクトルを得ることに成功した。この実験手法では、量子ポイントコンタクトという数10ナノメートル程度の微小領域における核スピンを偏極・検出しており、従来の方法に比べて高感度かつ局所的な核スピンの電氣的制御が可能になった。

3. 今後の展開

本研究では、抵抗検出型核磁気共鳴法が半導体界面の電子スピン偏極分布を計測する有効な実験手法であることを示すことができた。一方で、核スピンを偏極するために量子ホール効果崩壊という特殊な条件を必要とすることがこの実験手法の限界を与えていることも明らかになった。今後は量子ポイントコンタクト素子を用いた核スピン偏極手法や強磁性体／半導体接合の電子スピン注入による核スピン偏極手法と組み合わせることによって、スピントロニクスデバイス中での電子スピン偏極空間分布測定へと展開したい。そして、今回達成できなかった走査型プローブを用いた核磁気共鳴顕微鏡の開発についても今後検討を重ね、実現につなげたい。

4. 自己評価

デバイス構造や測定方法を工夫することにより、半導体デバイス界面の電子スピンおよび核スピンの非一様な偏極状態を示したことで、目標の第一段階は達成できたと考えている。しかし、走査型プローブを用いた核磁気共鳴顕微鏡の開発が計画通り進まず、研究期間内に当初の研究目的を達成するには至らなかった。一方で、量子ポイントコンタクト素子を用いた新しい核スピン偏極手法が見つかったのは予想外の成果であり、微小領域における核磁気共鳴の局所測定に向けて発展させていきたいと考えている。

5. 研究総括の見解

抵抗検出型核磁気共鳴法という新しい核スピン偏極分布の計測法を駆使して、量子ホール相崩壊による核スピン偏極過程を観察したことは、重要な成果である。また、その核磁気共鳴スペクトルから電子スピン偏極の空間分布についても手掛かりが得られた。量子ポイントコンタクトを用いた核スピン偏極効果とその検出法も見出して、新たな発展への道筋も開かれた。有効な成果を得ている。

6. 主な研究成果リスト

論文(原著論文)発表

1. M. Kawamura, K. Kono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, "Spatial gradient of dynamic nuclear spin polarization induced by breakdown of quantum Hall effect", *Phys. Rev. B* **83**, 041305 (2011).
2. M. Kawamura, T. Yamashita, H. Takahashi, S. Masubuchi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, and T. Machida, "Strain-induced enhancement of electric quadrupole splitting in resistively detected nuclear magnetic resonance spectrum in quantum Hall systems", *Appl. Phys. Lett.* **96**, 032102 (2010).
3. M. Kawamura, M. Ono, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, K. Hamaya, and T. Machida, "Dynamic nuclear polarization induced by breakdown of fractional quantum Hall effect", *Phys. Rev. B* **79**, 193304 (2009).