

論文内容の要旨

論文題目： 半導体二次元電子系における抵抗検出型電子スピン共鳴

(Electrically Detected Electron Spin Resonance in
Semiconductor Two-Dimensional Electron Systems)

氏名 松並 絢也

(1) はじめに

近年、半導体キャリアのスピン自由度を利用して新奇な機能デバイスを創出しようという試みが注目を集めている。電子スピン共鳴(ESR)は、スピン緩和時間の測定やスピン制御のための強力な手法であり、スピン物性やスピンデバイスの研究に威力を発揮する。ESR測定では多くの場合、試料の電磁波吸収量の変化として信号を検出する。この吸収量測定は、三次元半導体バルク試料などに対しては有効であるものの、信号強度が測定対象の電子数に比例するため、低次元系への適用が難しいという問題点がある。これに対して、試料の抵抗変化として ESR 信号を検出すれば、低次元系でも大きな信号が観測できる。二次元電子系について見ると、垂直磁場により離散的なエネルギー準位(ランダウ準位)が形成される量子ホール系において、抵抗検出型の ESR 測定が精力的に行われてきた。ところが、従来の二次元電子系の研究では、ESR による抵抗変化自体が議論の対象となることは少なかった。特に、抵抗変化の大きさから何らかの物理量が求められたことは無かったといっ

てよい。本研究では、半導体二次元電子系において、ミリ波(100 GHz)を用いて、ESR による電気抵抗変化を調べた。従来の二次元電子系の研究では、抵抗変化は主に ESR 信号を観測するための手段として用いていたのに対して、本研究では抵抗変化そのものを研究対象とした。以下に具体的な内容をまとめる。

(2) 共鳴による電気抵抗変化の要因の解明

まず、Si/SiGe ヘテロ構造中に形成された二次元電子系を用いて、ESR による電気抵抗変化の要因を解明した。これまでの研究において抵抗変化についての議論が進まなかった理由として、抵抗変化の要因が不明だったことが挙げられる。通常のランダウ準位配置では、ESR による対角抵抗率の増加 $\Delta\rho_{xx} > 0$ が観測されるが(図 1)、化学ポテンシャル変化の効果と電子温度上昇の効果は共に対角抵抗率の増加をもたらすため、どちらが観測される正の $\Delta\rho_{xx}$ に対して支配的な寄与をもつのか分かっていなかった。

本研究では、 $\Delta\rho_{xx}$ に内在するこれら 2 つの効果を分離するため、ランダウ準位と化学ポテンシャルとの間の配置を最適化した[図 2(a)]。これは、磁気抵抗振動の二次元面と磁場との間の角度に対する依存性を解析して、ゼーマン分離エネルギー(E_z)とサイクロトロン・ギャップ($\hbar\omega_c$)の比を調節することにより行った。その結果、ESR による対角抵抗率の減少 $\Delta\rho_{xx} < 0$ を観測し、それが化学ポテンシャルの変化に起因することを突き止めた[図 2(b)]。さらにその過程で、ESR により生成された光励起キャリアが、スピンの向きは変えずに格子へエネルギーを緩和し、熱励起キャリアと対消滅することを示した[図 2(a)]。また、熱浴モデルを用いて共鳴条件下の定常状態における熱流の様子を示し、スピン系と軌道運動系との間で温度が異なる非平衡状態が実現することを指摘した。

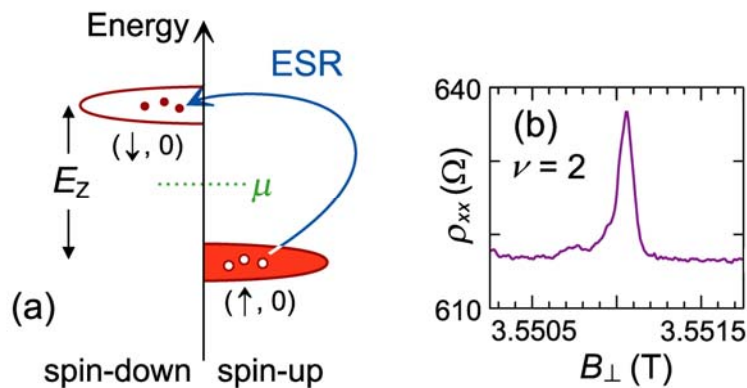


図 1: 従来型のランダウ準位配置におけるキャリアの励起過程と ESR 信号

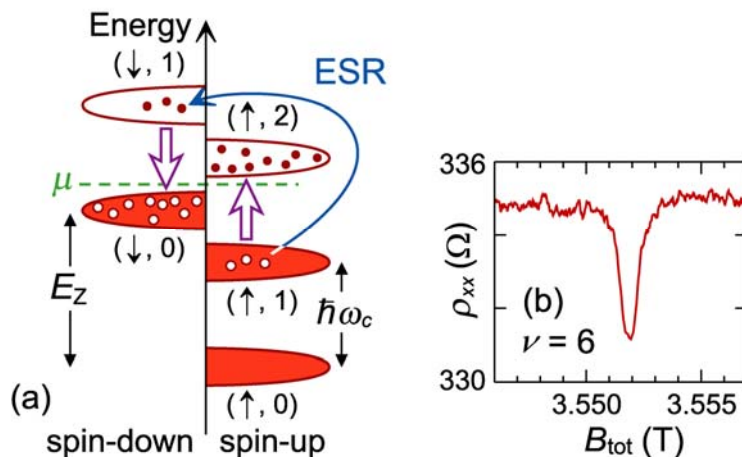


図 2: 最適化したランダウ準位配置におけるキャリアの励起・緩和過程と ESR 信号

(3) スピン緩和時間の導出

次に、Si/SiGe ヘテロ構造二次元電子系において、スピン縦緩和時間 T_1 および横緩和時間 T_2 を求めた。このために、面内磁場下において観測される正の磁気抵抗を用いて、抵抗率 ρ とスピン偏極率 P との関係を較正した(図3)。抵抗率 ρ の増加は $P=1$ となる臨界磁場(図3では 5.3 T)において大きく折れ曲がることから、その大部分はスピン偏極に起因することがわかる。面内磁場下ではこの ρ の正の P 依存性 $d\rho/dP > 0$ を利用することにした。

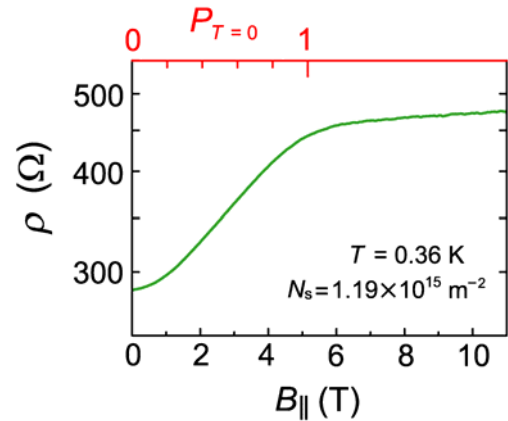


図 3: 正の面内磁気抵抗

面内磁場下において、ESR による抵抗率の減少 $\Delta\rho < 0$ を観測した[図 4(a)]。前頁の量子ホール系の場合と同様に、光励起キャリアがスピン縦緩和せず格子へエネルギーを緩和した結果、 P が減少し、 ρ が減少したものと理解できる[図 4(b)]。ESR 信号のピーク値の絶対値は温度の上昇と共に減少したが、この振る舞いは、ESR による P の変化を ΔP として、 $\Delta P/P$ のピーク値が -0.08 と温度に依らない値を持つと仮定した計算結果により再現することができた(図 5)。さらに、Bloch 方程式の解を用いて、 $\Delta P/P$ からスピン緩和時間を求めた。その結果、面内磁場 3.55 T において、 $T_2 \cong 10$ ns であるのに対して $T_1 \sim 1$ ms であることを見出した(図 6)。この結果は、従来の Si/SiGe ヘテロ構造試料を用いた ESR 測定において T_1 と T_2 が共に ~ 1 μ s と求めたことに比べると対照的である。この違いの原因として、従来の研究では X バンドの ESR スペクトロメータを用いていたために共鳴磁場が 0.34 T に限定されていたことと、試料の移動度が本研究に比べると低かったことが挙げられる。Rashba field による D'yakonov-Perel' スピン緩和機構を考察し、高周波スピン歳差運動による Rashba field の効果の抑制により、今回得られた長い T_1 を定性的に説明した。それと同時に、モデルと実験結果との間に定量的なずれを見出し、電子の軌道散乱の性質を詳細に調べる必要があることを示した。

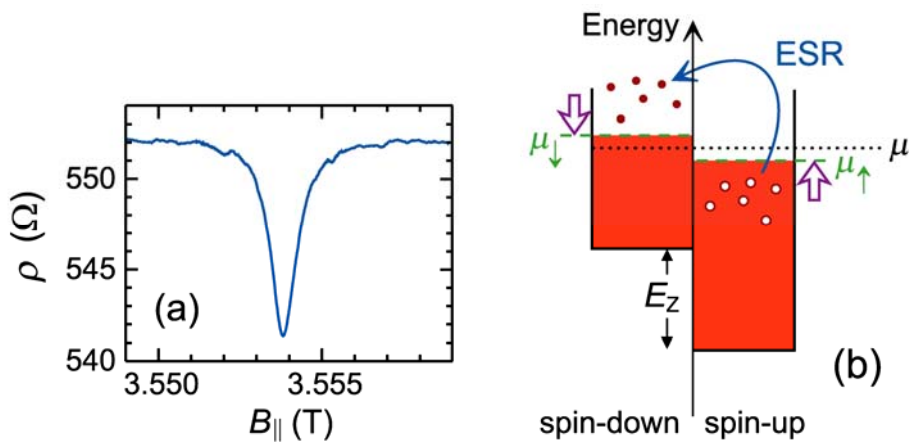


図 4: 面内磁場下における ESR 信号とキャリアの励起・緩和過程

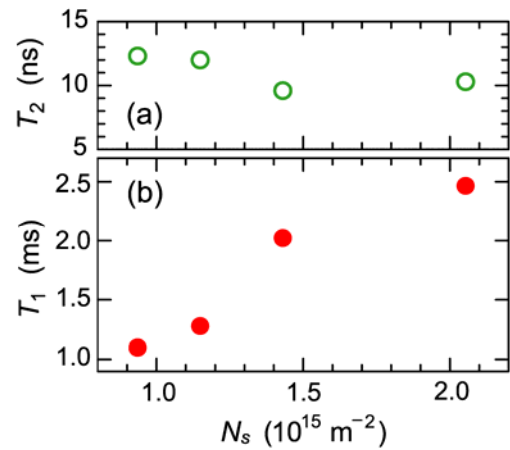
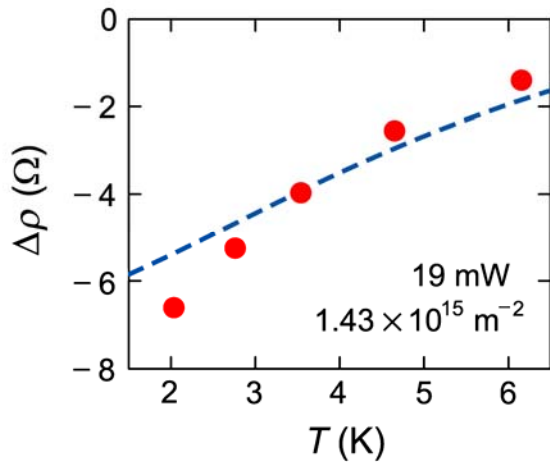


図 5: ESR 信号のピーク値の温度依存性。 図 6: スピン緩和時間と電子密度との間の関係

(4) 吸着 Fe 原子と表面二次元電子系との間の磁氣的相互作用の探索

半導体表面に金属を吸着させると、吸着金属原子から半導体へ電子が供給され、表面近傍に二次元電子系が形成される。これら半導体表面二次元電子系は、従来は光電子分光測定や走査型トンネル分光測定などにより研究されてきたが、最近では InAs および InSb (110) 劈開表面において面内伝導の精密測定も行われるようになってきた。表面二次元電子系ならではの自由度として、吸着物質の多様性がある。しかし、これまでに Ag などの貴金属を吸着させた場合は、吸着原子はドナーとして電子を供給し、また散乱体となり電子の移動度を制限はするものの、それ以上の働きを示さなかった。

本研究では、磁性体である Fe を吸着させた InAs および InSb (110) 劈開表面において、吸着 Fe 原子と表面二次元電子系との間の磁氣的相互作用の存在を立証するため、吸着 Fe 原子の ESR を表面二次元電子系の電気抵抗変化として観測することを試みた。ミリ波照射による抵抗変化は二次元電子系自身の電子温度上昇の効果で説明でき、吸着 Fe 原子の ESR による抵抗変化は観測されなかった(図 7)。

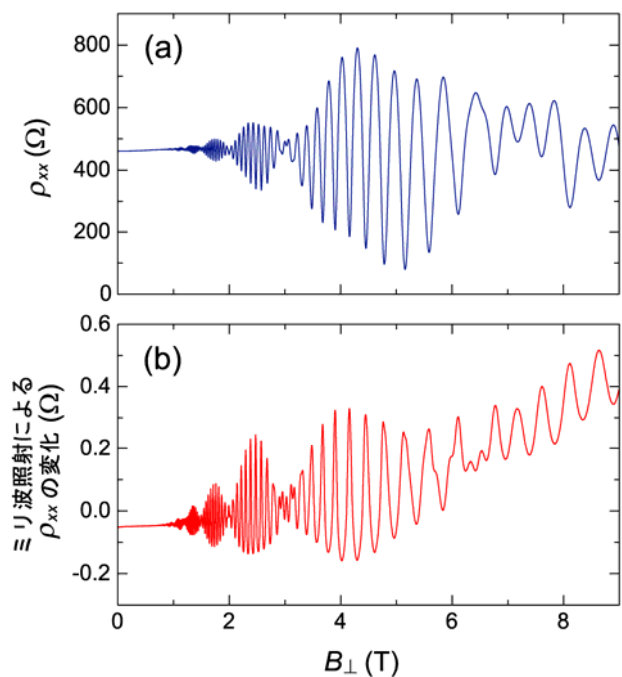


図 7: Fe を 0.16 原子層吸着させた InAs(110) 劈開表面において観測された、磁気抵抗振動およびミリ波照射による対角抵抗率の変化