

## 論文内容の要旨

論文題目 強相関シリコン 2 次元電子系における磁気輸送とサイクロトロン共鳴

(Magnetotransport and cyclotron resonance in strongly  
correlated silicon two-dimensional electron systems)

氏名 大屋 満明

### (1) 研究の背景

半導体界面 2 次元系の研究は量子ホール効果などの強磁場での研究を中心に発展してきたが、近年、Si-MOSFET 2 次元電子系や GaAs/AlGaAs 2 次元正孔系などの強相関 2 次元系におけるゼロ磁場下での振る舞いが注目されている[1,2]。これらの系ではスケーリング理論とは矛盾した金属-絶縁体転移が観測されている。金属相側では低温下での急激な電気抵抗の減少が観測されており、スピン自由度の重要性が明らかにされ、さまざまな理論が提唱されているにもかかわらず、そのメカニズムについては未だにコンセンサスが得られていない。一方、絶縁体相側の研究は測定が困難なこともあり、金属相側ほど盛んに研究は行われていないが、高温超伝導体の研究においてモット絶縁体の研究が重要なように、2 次元金属相の電子状態・スピン状態を理解する上においても量子融解前の絶縁体相の電子状態を理解することは非常に重要である。また、最近特に注目を集めているのが金属-絶縁体転移点近傍におけるスピン状態であり、理論的にも実験的にも精力的に研究が続けられている。金属相でのスピン磁化率が金属-絶縁体転移点に向かって発散するとの報告もあるが[3,4]、現在のところ明確な結論は出しておらず、絶縁体相でのスピン状態の研究が期待されている。絶縁体相での電子状態は Wigner 結晶状態が有力な候補であるが、金属相におけるシュブニコフ・ド・ハース振動 (SdH 振動) と同様な磁気抵抗振動が絶縁体相においても観測されていることから、磁場中においてはサイクロトロン運動を取り込んだ多体の量子力学的状態が実現している可能性もある。

## (2) 研究の目的

本研究の目的は大きく分けて以下の2つである。

1. 絶縁体化に伴うスピン磁化率の発散の有無を直接実験で明らかにするため、Si-MOSFET 試料の絶縁体相におけるスピン状態を調べる。そのために、2次元面と磁場との角度を制御することにより磁場の軌道効果とゼーマン効果を分離して、極低温下における磁気抵抗効果の系統的な測定を行う。
2. 絶縁体相における磁気抵抗振動とサイクロトロン運動との関連を解明するための第一歩として、Si/SiGe ヘテロ構造試料の金属相におけるサイクロトロン共鳴吸収の測定を行う。金属-絶縁体転移点に近づく過程におけるサイクロトロン散乱時間の変化を明らかにする。

## (3) 実験結果と考察

図1はSi-MOSFET 試料でのさまざまな電子濃度における対角抵抗率の垂直磁場成分依存性である。これらのデータはトータル磁場  $B_{\text{tot}} = 9\text{T}$  と固定したもとで試料を回転させることによって得たものである。低抵抗領域（金属相）においてはランダウ準位充填率  $\nu \approx 4, 6, 8, 10$  に対応する対角抵抗率の極小（SdH 振動）が観測されている。一方、明瞭なランダウ準位が形成されているとは考えにくい  $\rho_{xx}(B_{\perp} = 0) \sim 10^8 \Omega$  という非常に高い抵抗領域（絶縁体相）においても  $\nu \approx 4$  に対応する対角抵抗率の極小が観測された。

図2はスピンの磁気抵抗にもたらす影響を調べるために幅広い範囲のトータル磁場のもとで試料回転実験を行った結果である。金属相での実験（図2(a)）同様、絶縁体相での実験（図2(b)(c)）においてもトータル磁場を9Tから下げていくにつれて対角抵抗率の極小の位置がシフトしていく振る舞いが観測された。これは絶縁体相におけるスピン状態を知る上において非常に重要な発見であると考えている。

図3は試料回転実験から得られた対角抵抗率の極小の位置  $B_{\perp}$  をトータル磁場に対してプロットしたものである（縦軸は  $1/\nu_{\text{min}} = eB_{\perp}/hN_s$ ）。金属相での実験結果（図3(a)）を見ると、あるトータル磁場（臨界磁場  $B_c^{\text{osc}}$  とする）を境にして傾きが急激に変化している

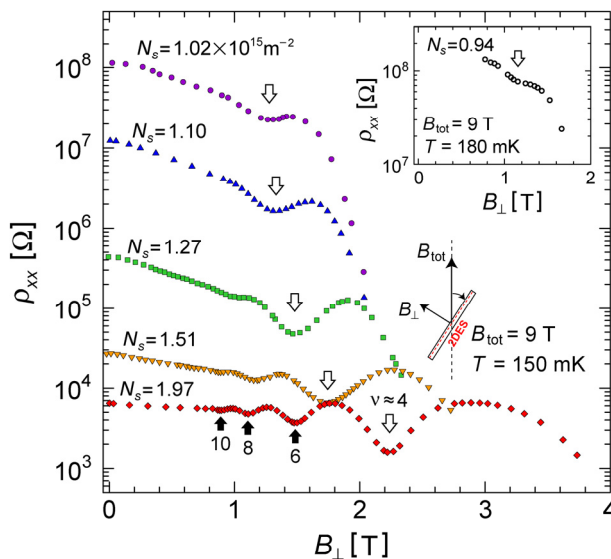


図1: 対角抵抗率の垂直磁場成分依存性

が、SdH 振動の描像が成り立つこの領域ではアップスピンを持つ電子の濃度変化によるものとして解釈されており[5]、この臨界磁場  $B_c^{\text{osc}}$  において2次元電子系のスピンの完全偏極する ( $P=1$ ) もと考えられている。図中の点線は  $P=1$  となる臨界磁場  $B_c^{\text{osc}}$  まではスピン偏極率がトータル磁場に対して線形的に増加するものと仮定した場合の  $\nu_{\uparrow} = 4$  および  $\nu_{\uparrow} = 6$  に対応する極小点の位置を表したものである。一方、絶縁体相での実験結果（図3(b)(c)）も金属相の

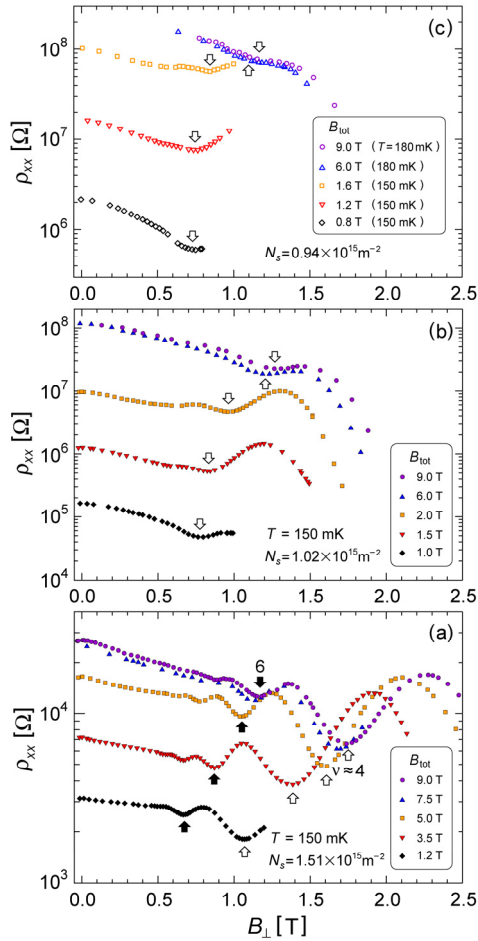


図2：さまざまなトータル磁場下での試料回転実験；  
(a) 金属相, (b) (c) 絶縁体相.

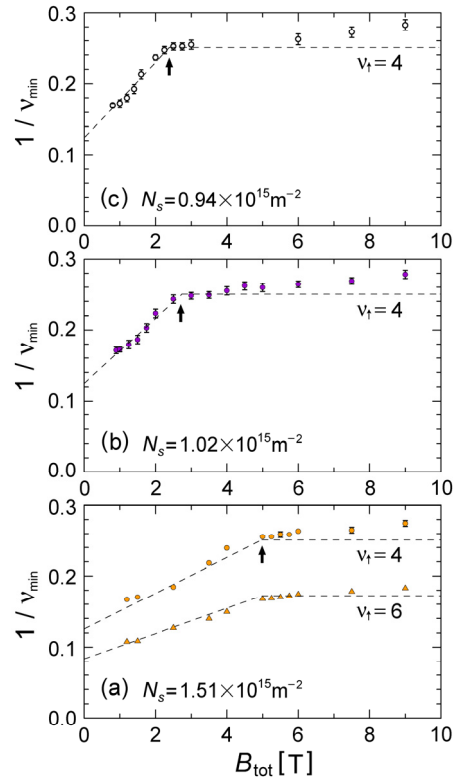


図3：対角抵抗率の極小の位置のシフト；  
(a) 金属相, (b) (c) 絶縁体相.

それと非常によく似た振る舞いをしている。現時点では絶縁体相における磁気抵抗振動のメカニズムは分かっていないが、スピンの影響を与えるトータル磁場に対して対角抵抗率の極小の位置が系統的に振る舞うことから、今回の実験結果はゼロ磁場下での絶縁体相において自発的なスピン偏極は起きていないことを強く支持するものである。

図4はSi/SiGeヘテロ構造試料の金属相においてサイクロトロン共鳴吸収の測定を行った結果である。今回は低磁場領域での電子状態に着目しているために共鳴周波数はミリ波帯になり、ボロメーターを用いた手法は困難である。よって、抵抗の大きな温度変化を利用して2次元電子系そのものをボロメーターとする手法を採用した。

図5はミリ波吸収による抵抗変化をジュール発熱による抵抗変化と比較することでミリ波吸収エネルギーを見積もった結果である。この吸収線幅からサイクロトロン散乱時間 $\tau$ を見積もることができた。

図6はサイクロトロン散乱時間 $\tau$ に対するゼロ磁場での電子移動度から求めた散乱時間 $\tau_0$ の比 $\tau_0/\tau$ を電子濃度の関数としてプロットしたものである。電子相関の強い低電子濃度側(絶縁体相側)へと向かうにつれて $\tau_0/\tau$ は小さくなり、外挿すると $\tau_0/\tau < 1$ となる兆候が見られた。電子相関が関与する局在化により絶縁化した場合においても、サイクロトロン運動の自由度が残る可能性を示唆している。

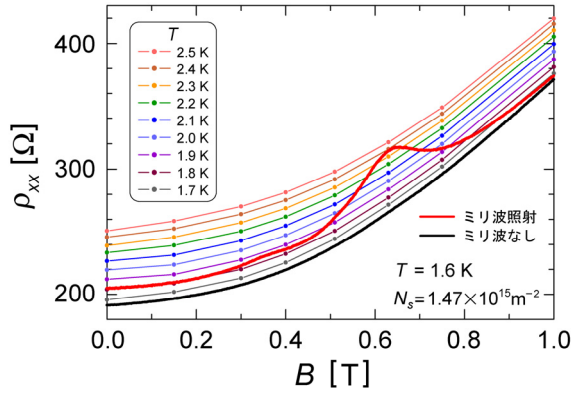


図4：電子温度加熱による抵抗変化として得たサイクロトロン共鳴信号

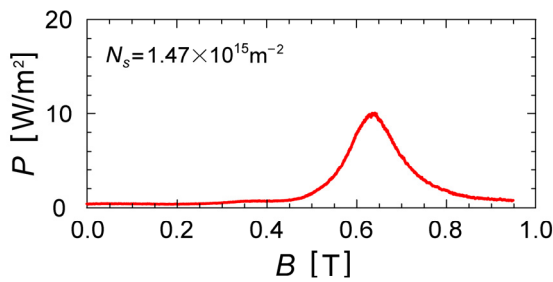


図5：ミリ波吸収エネルギー曲線

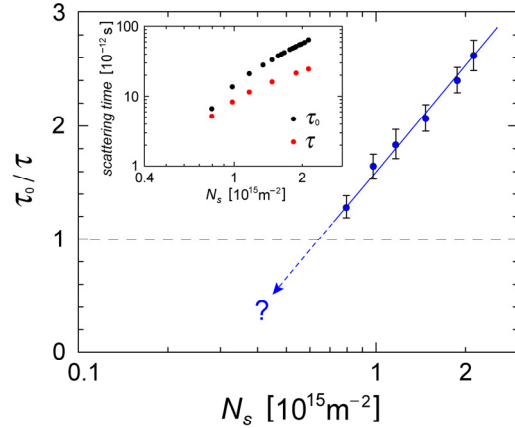


図6：散乱時間の比の電子濃度依存性

#### (4) 総括

Si-MOSFET 試料の絶縁体相において明瞭な磁気抵抗振動を観測し、トータル磁場の大きさを変えて試料回転実験を行うことで対角抵抗率の極小の位置が変化することを見出した。この結果から絶縁体相においても金属相同様にスピン自由度が生き残っていることを明らかにした。また、Si/SiGe ヘテロ構造試料の金属相におけるサイクロトロン共鳴実験からは、電子相関の強い低電子濃度側（絶縁体相側）においては磁場中での散乱時間の方がゼロ磁場での散乱時間よりも長くなる兆候を示す結果を得た。

#### 参考文献

- [1] E. Abrahams, S. V. Kravchenko, and M. P. Sarachik, Rev. Mod. Phys. **73**, 251 (2001).
- [2] S. V. Kravchenko and M. P. Sarachik, Rep. Prog. Phys. **67**, 1 (2004).
- [3] A. A. Shashkin, S. V. Kravchenko, V. T. Dolgoplov, and T. M. Klapwijk, Phys. Rev. Lett. **87**, 086801 (2001).
- [4] S. A. Vitkalov, H. Zheng, K. M. Mertes, M. P. Sarachik, and T. M. Klapwijk, Phys. Rev. Lett. **87**, 086401 (2001).
- [5] T. Okamoto, K. Hosoya, S. Kawaji, and A. Yagi, Phys. Rev. Lett. **82**, 3875 (1999).