

論文内容の要旨

論文題目 InAs 劈開表面に吸着した鉄原子層における二次元スピングラス

氏名 望月 敏光

[研究動機]

物質中のスピン間相互作用がランダムであり、全ての相互作用を得ることの出来る状態が存在しない系では、スピングラスと呼ばれる秩序相がしばしば見られる。スピングラス中ではスピンがランダムな方向を向いたまま周囲との相互作用によって凍結しており、帯磁率の温度依存性における鋭いカusp状ピークや交流帯磁率の周波数依存性といった特異な物性を示す。スピングラスは解析的に扱うのが難しい系であるばかりでなく、数値計算で取り扱う上でも難問であり、計算物理の分野で盛んに研究されている。スピングラスの研究を通じて生まれた数値計算の手法はタンパク質の構造解析や回路設計の最適化問題といった他分野の計算機科学にも応用されている。

系の次元が下がるとスピングラス秩序は起きづらくなる。再近接スピン間の相互作用だけを考えた正方格子系では有限温度でのスピングラス転移はないものと計算されている。実験的には2次元のスピングラスは層状物質や薄膜において報告されているが、単原子層における厳密な意味での2次元スピングラスは報告されていない。

こうした中で、InAs や InSb に吸着させた強磁性原子の単原子層は2次元スピングラスの探索の舞台として有望である。InAs 表面上のFe原子の間の相互作用は原子間の位置関係によって符号を変えることが計算によって示唆されており、ランダムに散らばった原子のスピン間相互作用にはフラストレーションが期待される。従って吸着を低温で行うことで吸着物質の拡散や凝集を最小限に留めて吸着原子が半導体表面の上にランダムに散らばった状態を実現すれば、ある被覆率でのスピングラスを期待できると考えられる。

InAs や InSb に吸着させた原子層でのスピングラスの探索においては、その表面に誘起される反転層2次元電子系が非常に強力なプローブとなる。InAs や InSb といった、バンドギャップの小さい半導体に別の物質を極少量吸着した系においては、その表面に伝導電子系が誘起されることが知られていた。この伝導電子系が $1 \text{ m}^2 / \text{Vs}$ 程度の高い移動度を持つ、並列伝導のない完全な2次元性を持つことを我々は発見している。この2次元電子系の電気抵抗には表面のスピン状態が何かしらの形で反映されることが期待できたので、この電気伝導測定を通じて表面吸着Fe原子層のスピングラスの探索を行った。

[実験装置]

我々は劈開面2次元電子系の電気伝導測定が行うための極めて特殊な形状の試料を開発した。また低温、超高真空中で劈開したインジウム砒素表面に金属を吸着し、さらに強磁場を印加して磁気抵抗測定を行うための専用の試料ホルダー及び冷凍機の開発を行った。

図1に劈開面2次元電子系の電気伝導測定を行うための試料および測定のための試料ホルダーの低温部分を示す。試料は傷に非常に繊細であるが全ての面に金属端子を配置せねばならない。また作成した試料の表面には絶縁ワニス極めて薄く塗布されており、並列伝導の発生を防いでいる。

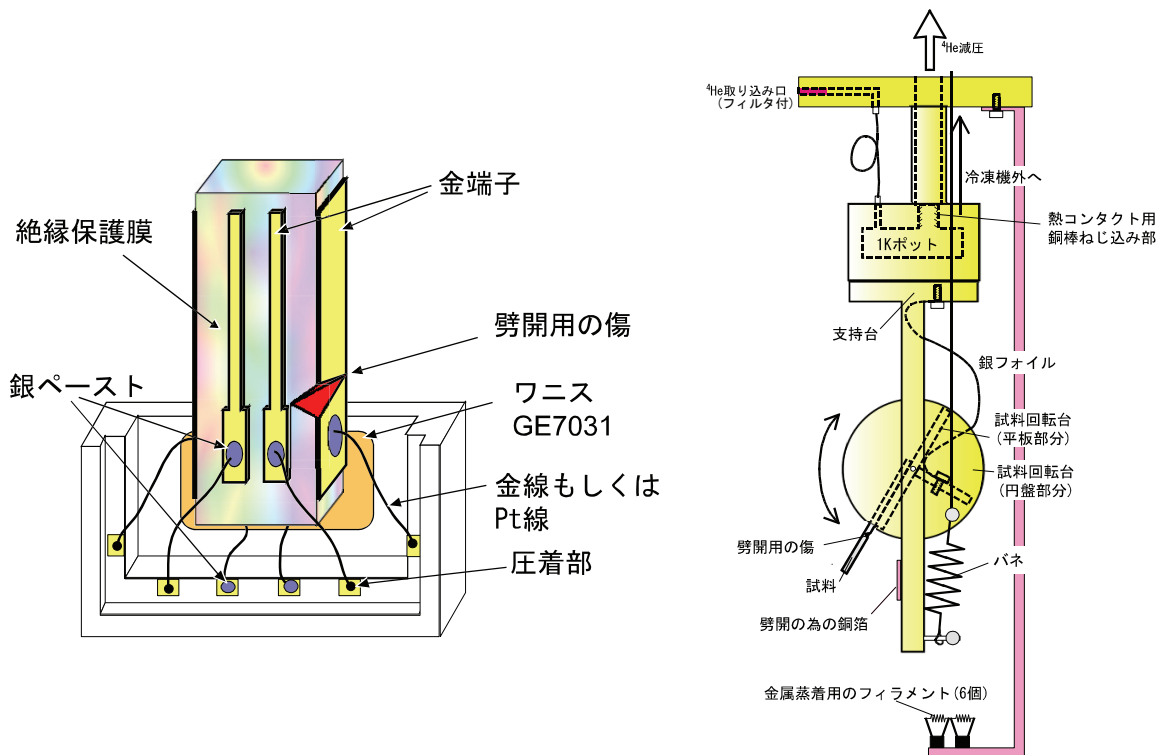


図 1

(左) 劈開面の 2 次元電子系の電気伝導測定をするための InAs または InSb 試料の形状。バルクウェハを加工して作成する。こちらから見えていない面にも電圧端子 2 本が配置されている。こうした特殊形状でありながら表面の原子レベルで傷が無い状態である必要があり、試料作成は非常に難しい。

(右) 試料を劈開し、低温超高真空を保ったまま金属蒸着し、電気伝導測定までを行うための試料ホルダーの低温部の概念図。

試料ホルダーの心臓部は 4 K 部分に取り付けられた試料へ金属を吸着するためのフィラメント及び 1 K ポットと熱接触した試料回転台である。これらは直径 5 cm の円筒型超高真空チャンバー内にコンパクトに収められている。これを用いて試料の劈開、金属の吸着、そして電気伝導測定を全て低温・超高真空環境を保ったまま行うことができる。

【磁気抵抗効果の履歴現象】

我々は Fe 吸着誘起の InAs 表面 2 次元電子系で 2 次元系に平行な磁場下での磁気抵抗効果の履歴現象を観測した。これは 0.4 原子層付近の特定の吸着量領域でのみ観測された。2 次元系に垂直に磁場を掛けた場合の磁気抵抗振動の様子などから 2 次元系のスピン偏極は起きておらず、抵抗変化が表面吸着物質と 2 次元系間のスピン交換散乱によるものであると考えられた。

図 2 (a) は 0.42 原子層の Fe を吸着した InAs 表面 2 次元電子系の平行磁場下での磁気抵抗効果である。Fe を吸着して初期冷却した後の試料の対角抵抗率は 223.0Ω であるが、平行磁場を 9 T 印加することで抵抗は 1.5Ω 減少した。(b) に拡大して示したように、続く $9 \text{ T} \rightarrow -9 \text{ T}$ の磁場掃引時と更にその後の $-9 \text{ T} \rightarrow 9 \text{ T}$ の掃引時には磁気抵抗効果のピークが 0.8 T 程度ずれており、明らかな履歴現象が観測された。(c) で示したのは履歴現象が見られない 0.17 原子層の際の平行磁場下の磁気抵抗効果である。Fe 以外の吸着物質を使った場合の平行磁場下の磁気抵抗効果もこれと非常に似ている。(a) (b) の磁気抵抗効果も大まかな形は似ているが、磁気抵抗効果の値が 3 T 程度の磁場下で負になっている。これは 0.4 原子層程度の Fe 吸着系でしか見られない特徴である。

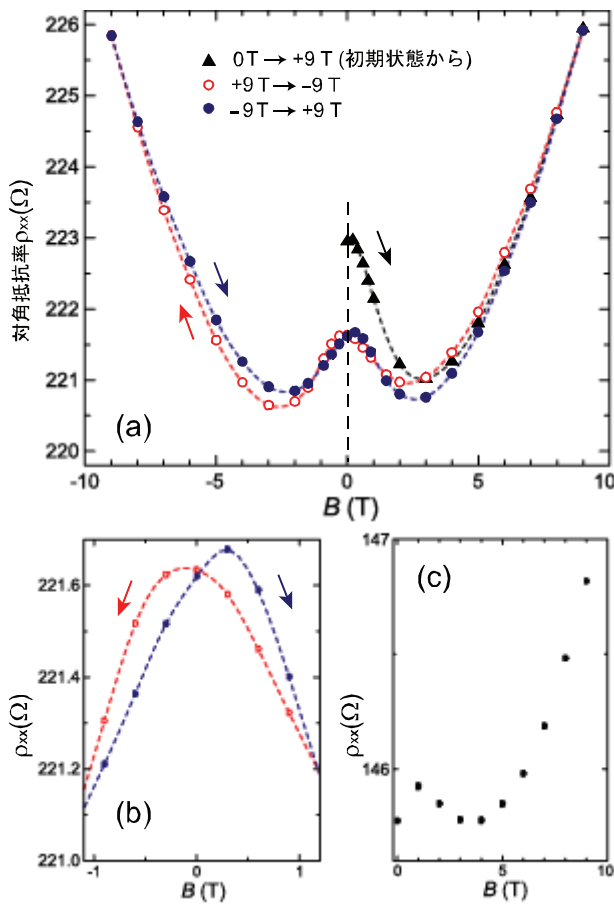


図 2

(a) 0.42 原子層の Fe を吸着した InAs 表面 2 次元電子系の平行磁場下での磁気抵抗効果。黒で示した三角のシンボルは磁場の初期印加時の磁気抵抗効果で、赤で示した白抜き丸は続く 9 T → -9 T の磁場掃引時、青で示した丸はさらに続く -9 T → 9 T の掃引時の磁気抵抗効果を示す。明らかな履歴現象および 3 T 前後での負の磁気抵抗効果が特徴。

(b) (a) の拡大図。9 T → -9 T と -9 T → 9 T で磁気抵抗効果のピークが 0.8 T 程度ずれている。

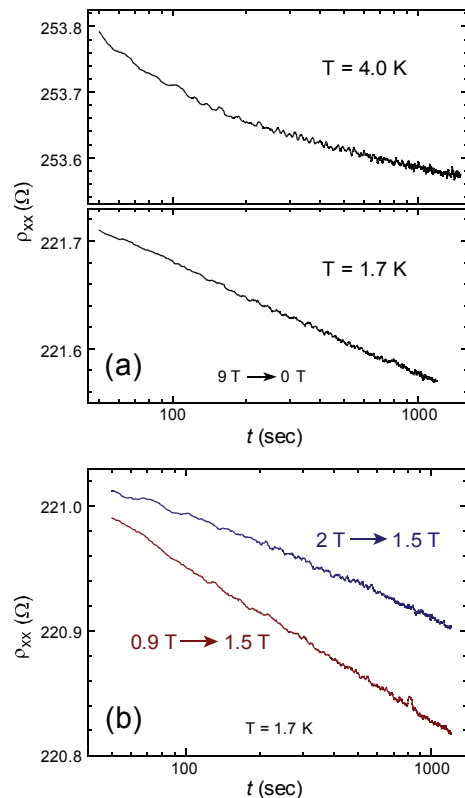
(c) 同じ試料の、0.17 原子層における平行磁場下の磁気抵抗効果。4 T 以上での正の磁気抵抗効果の形は 0.42 原子層の場合と大差無いが、磁気抵抗効果の値は常に正の値を取る。

[磁気抵抗効果の長時間緩和]

履歴現象が見える 2 次元系は、磁場の掃引後に時間の対数に比例した非常に遅い緩和を示した。この緩和は常に抵抗の減少として表れ、残留磁気抵抗効果の幅が磁場掃引後、時間と共に増大することを示していた。

図 3: (a) 0.42 原子層における、9 T → 0 T の磁場掃引後の磁気抵抗効果の長時間緩和。1.7 K では時間の対数に比例した緩和が見えているが、4.0 K ではそうならない。またいずれも単一時定数の指数減衰ではフィットされない。こうした長時間緩和はスピングラスの残留磁化の長時間緩和に対応する振る舞いである。スピングラスの緩和も単一字定数の指数減衰では表されず長い長時間緩和を見せるが、統一的にある関数形になるということもない。

(b) 0.42 原子層の平行磁場下 1.5 T における磁気抵抗効果の緩和。磁場を印加してきた方向に関わらず抵抗が減少していく様子が見える。これは表面の磁化と抵抗の値が 1:1 だと考えると理解が難しい。吸着 Fe 層のスピンの安定状態になることによるスピン交換散乱の抑制か、あるいはスピンの空間的なランダムネスが時間と共に変化し、2 次元電子系のフェルミ波数から離れていくことで散乱が抑えられる効果ではないかと見ているが、決定的な事はまだ分からない。



[残留磁気抵抗効果の印加磁場依存性]

磁場印加による抵抗の減少は 12 K で試料をアニールする事で解消される。これによって試料は Fe 吸着後の初期冷却時と同じ状態になる。これを用いて、負の残留磁気抵抗効果の印加磁場依存性の系統的な測定を行った。その結果 Ising 異方性に対応する残留磁気抵抗効果の磁気方位依存性が観測された。また低温で磁場を加えるゼロ磁場冷却時よりも 12K で磁場を印加して試料を冷却した磁場中冷却時の方が大きな残留磁気抵抗効果が得られることが分かった。これは吸着した Fe 層に Ising 異方性があり、またゼロ磁場冷却時よりも磁場中冷却時の方が残留磁化が大きいことを示している。

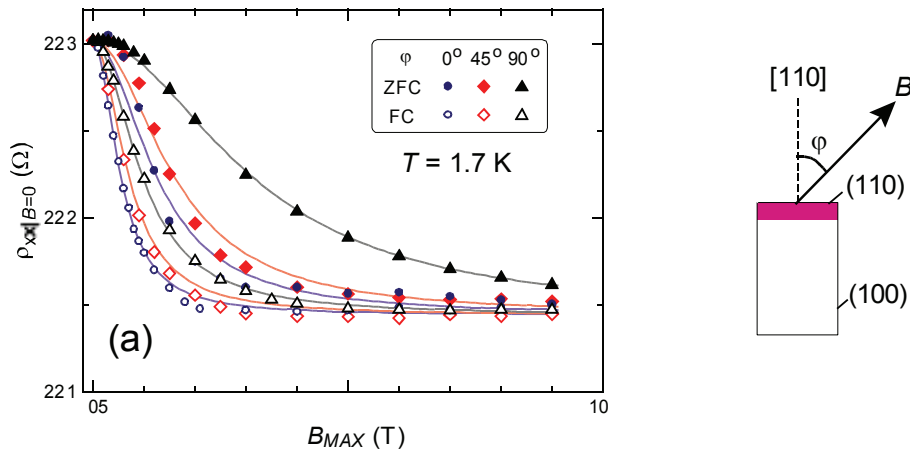


図 4: 0.42 原子層の Fe 吸着 InAs 表面 2 次元電子系における、残留磁気抵抗効果の印加磁場依存性。2 次元面に垂直な磁場を印加した場合に抵抗はもっとも早く減少し、平行な場合はもっとも遅かった。また低温で磁場を印加するよりも磁場中で試料を冷却する方が抵抗の減少幅が大きかった。但し減少幅の飽和値はどの条件でも 1.58 Ω であった。

[結論]

残留磁化がゼロ磁場冷却時と磁場中冷却時で異なる様子を示すことや、残留磁化が長時間緩和緩和することはスピングラスの特徴である。今回 Fe 吸着系の磁気抵抗効果でこれに対応する振る舞いが見られた。Fe の抵抗は s-d 相互作用を通じて吸着 Fe のスピン状態に影響されている(図 5)と見られるので、吸着した Fe 原子層は厳密な 2 次元性を伴うスピングラスというこれまで見られたことのない特異な磁気秩序を示したと言える。

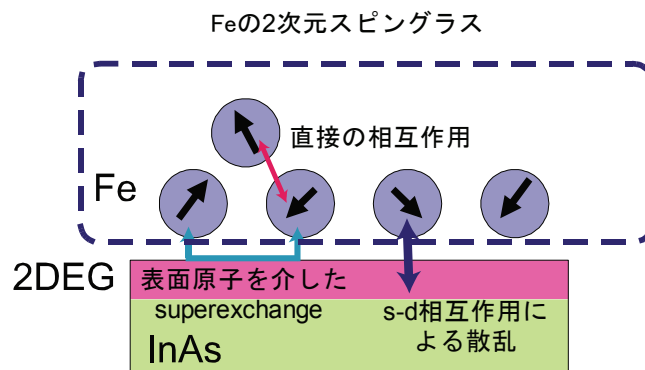


図 5: 磁気抵抗効果測定を系統的に行うことで得た、InAs 表面の吸着 Fe 原子層の磁気秩序の描像。Fe 原子間は直接及び InAs 原子を 2 から 4 原子程度経由した間接の相互作用の競合によってフラストレートしておりスピングラス相となる。

Fe 原子の状態は s-d 交換相互作用による散乱により 2 次元電子系の電気抵抗に反映される。