

「量子効果等の物理現象」
平成 8 年度採択研究代表者

家 泰弘

(東京大学物性研究所 教授)

「微細構造におけるスピン量子物性の開拓」

1 . 研究実施の概要

本研究プロジェクトでは、人工的に作成した微細構造や表面に特有の磁性および磁性に関連した量子伝導現象の基礎物理を開拓することを目的としている。特に平成12年度に進展のあった主な点は以下の通りである。(1)短周期変調ポテンシャルを付加した2次元電子系の強磁場伝導を調べ、充填率 $\nu=3/2$ における複合フェルミオンの幾何学共鳴の検出に成功した。そこからスピン偏極に関する知見を得た。(2)単電子トランジスタを用いた局所ポテンシャル検出法を開発し、分数量子ホールエッジ状態の検出が可能であることを示した。(3) - V族希薄磁性半導体における低温アニール効果を確立し、それを利用してこの系特有の金属絶縁体転移および強磁性発現機構に関する系統的研究を行った。(4)表面自己形成を利用して作製したナノスケールの磁性体規則配列の磁性を原子層レベルで明らかにした。(5)白金基板上のマグネタイト薄膜のスピン分解光電子分光を行い、Verway転移上下におけるスピンバンドのふるまいの知見を得た。

2 . 研究実施内容

1 . 2次元電子系の量子伝導

1 . 1 複合フェルミオンのスピン偏極

ランダウ準位充填率が $\nu=1/2$ 近傍の強磁場下2次元電子系を記述する上で複合フェルミオン・モデルが一定の成功を収めている。 $\nu=3/2$ 近傍についても同様の考え方が適用可能であると予想されるが、実験的検証は少ない。特に複合フェルミオン(Composite Fermion以下CFと略記)がスピン偏極しているか否かに関して、互いに異なる結果が報告されている。われわれはGaAs/AlGaAs2次元電子系に短周期(92nm)の変調構造を付加した試料を作製し、低温強磁場における伝導を調べた。顕著な差がランダウ準位充填率 $\nu=3/2$ 近傍において見られる。この領域で見られる構造はCFのサイクロトロン半径と変調周期との整合効果による磁気抵抗振動である。 $\nu=3/2$ CFは密度が磁場とともに変化する点が $\nu=1/2$ の場合とは異なり、CFに対する有効磁場は $B_{\text{eff}}=-\chi(B-B_{(\nu=3/2)})$ となる。観測された整合振動の抵抗極小の位置はこの有効磁場の表式に基づき、さ

らにCFが完全スピン偏極していると仮定して計算したものとよく一致する。

1. 2 量子ホール効果のエッジ状態

GaAs/AlGaAs 2次元電子系試料の表面に単電子トランジスタを作製し、それを局所化学ポテンシャル・プローブとして用いることにより2次元電子系の化学ポテンシャルの磁場変化などを調べた。2次元電子系が量子ホール状態にあるとき、SETトランジスタのクーロン振動が減衰しノイズが増加する。サイドゲートによりエッジを移動させて、SETトランジスタ直下に圧縮性状態が来るようにするとクーロン振動が復活する。このような変化は量子ホール状態の非圧縮性を反映したもので、SETトランジスタ直下の2次元電子系がバイアスの変化に測定時間スケールでは追従しないためである。分数量子ホール状態については縦伝導度の消失が十分でないため直流での検出は難しいが、周波数依存性を見ることにより検出が可能であることを示した。これにより分数量子ホール状態のエッジを検出する見通しが立った。

2. 希薄磁性半導体における磁性と伝導

2. 1 Ⅲ族希薄磁性半導体における低温アニール効果

希薄磁性半導体 (Ga, Mn)As および (In, Mn)As において、分子線エピタキシー (MBE) 成長後の低温アニールが、特に Mn 濃度の高い試料について結晶の品質を大幅に向上し、安定化させることを見出した。高 Mn 濃度試料における品質の低下の原因が膜中に取り込まれた過剰 As と Mn が形成する複合欠陥にあること、低温熱処理による過剰 As の蒸発が欠陥を消失させ、膜質の向上と安定化をもたらすという、メカニズムがほぼ明らかとなった。さらに、この低温アニール効果を積極的に利用して同一の試料において伝導度や強磁性転移温度を系統的に変化させつつ物性測定を行う手法を確立した。

2. 2 (Ga, Mn)As における強磁性の起源

希薄磁性半導体 (Ga, Mn)As における電子状態と強磁性発現機構を探るため、赤外分光および軟 X 線吸収分光測定を行い、低温アニールによる強磁性転移温度の変化との相関を調べた。赤外領域の吸収実験で 100 meV 付近に線幅の広い吸収ピークが見いだされた。その強度は低温アニールによって強磁性転移温度を上昇させるにつれて増大した。このピークは、半ば束縛された Mn の d 軌道を起源とする正孔によるものと考えられ、金属的な伝導を起こしているキャリアが実は束縛される傾向の強い性格を有していることがわかった。Mn 2p 領域の軟 X 線吸収スペクトルは、 $Mn^{2+} + As 4p$ 正孔 ($d^5 \bar{\downarrow}$) と Mn^{2+} (d^5) の 2 つの成分からなることが見出され、さらに低温アニールによって後者の強度が減少する傾向が明確に観測された。これは過剰 As の減少に伴って $d^5 \bar{\downarrow}$ の割合が相対的に増加したものと解釈される。また $d^5 \bar{\downarrow}$ スペクトルの強度変化は強磁性転移温度の

変化と良く相関している。このことはAs4p正孔を介した二重交換的相互作用がMn3dスピン間の強磁性相互作用をもたらしていることを示唆する。

2.3 - 族希薄磁性半導体における金属非金属転移

(Ga, Mn)As系では、Mn濃度の増加とともに系が絶縁体から金属に転移し、さらに高濃度側で再び絶縁体に転移する特異な振る舞いが見られる。低温アンニール効果を利用して金属非金属転移直近の試料を作製し、磁場誘起非金属金属転移の様子を調べた。結果を有限温度2パラメータスケーリング理論によって解析を行ったところ、金属側、絶縁体側ともにそれぞれ単一の関数でスケーリングが可能であることが明らかになった。(In, Mn)Asについても測定を行い比較検討を行っている。

3. 表面微細構造における磁性

3.1 自己形成磁性ドットアレイ

前年度までに、窒素吸着銅(100)表面に自己形成される50nm角の正方格子状ナノ構造を利用して磁性ドットアレイを作製する手法を開発し、ニッケルとコバルトについて構造と磁性を調べてきたが、本年度は鉄についてナノ構造の成長過程を調べ、第1原子層の生成の様子が鉄とコバルトでは異なることが明らかになった。鉄の微粒子はコバルトに比べて保持力が大きいいため、ヒステリシス曲線の全体を測定することは現有のカー効果装置で印加できる磁場範囲を越えている。また、基板となる銅表面格子状ナノ構造の詳細な詳細なSTM観察を行い、銅清浄表面の見かけの高さが幅によって異なることを見出した。すなわち、幅の狭い畦道の部分は表面が低く、交差点は高く観察される。これは表面電子状態の幅による変化を反映するもので、表面における歪みの度合いの違いが原因と解釈している。表面歪みは、ヘテロ成長にとって重要でこの場合には歪みの少ない場所に核形成する。

3.2 白金上のマグネタイトのスピ分解光電子分光

マグネタイトにおける金属絶縁体転移(Verwey転移)の機構については、まだ不明な点が多く電子状態すらも解明されていない。これまでは、電子相関を無視した1電子近似バンド計算結果が高温相に対応するとして、光電子分光の結果が解釈されてきた。しかしながら、電子相関を取り入れた状態密度の計算結果は1電子近似バンド計算から得られる状態密度と顕著な違いがあり、低温相では電子状態密度が高温相とは異なっていると考えられる。これまでの光電子分光の結果では、Verwey転移に伴うフェルミエネルギー付近の状態密度のギャップ形成に注目させた研究がなされてきたが、必ずしも再現性あるデータが得られていない。われわれは、低温相のスピ分解状態密度を調べるために、白金(111)面上に形成した単結晶マグネタイト薄膜を用いて、低温相およ

び高温相のスピンドル分解光電子分光測定を行った。試料の面方位は(111)面であり、清浄表面を繰り返し形成することができる。また、チャージアップの問題も金属基板上の薄膜なので回避できている。得られたスペクトルから、低温相では高温相に比べて、少数スピンドルの状態密度がフェルミエネルギー付近で下がり、 -0.4eV と -0.9eV で上昇し、多数スピンドルの状態密度は -0.5eV 付近で上昇した。これらの特徴は、電子相関を取り入れたLSDA計算の結果と定性的に一致している。

3. 主な研究成果の発表 (論文発表)

原著論文

- M. Kawamura, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye
Non-Ohmic Vertical Transport in Multilayered Quantum Hall Systems
Physica E(2000)698-701.
- M. Kato, M. Sakairi, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye
Electron-Electron Scattering in Two-Dimensional Electron Gas under a Controllable Spatially Modulated Magnetic Field
Physica E(2000)735-737.
- Minoru Kawamura, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye
Non-Ohmic Out-of-Plane Conductance in a Multilayered Quantum Hall System
Physica B280(2000)380-381.
- Mayumi Kato, Makoto Sakairi, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye
Electron-Electron Umklapp Scattering in Two-Dimensional Electron Gas under Lateral Magnetic Periodicity
Physica B284-288(2000)1902-1903.
- Masato Ando, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye
Transport in Two-Dimensional Electron Gas in Inhomogeneous Magnetic Field
Physica B284-288(2000)1900-1901.
- Maxim Zalalutdinov, Hiroyuki Fujioka, Yoshiaki Hashimoto, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye
Vortex States in Microfabricated Superconducting Disk Probed by Tunneling Spectroscopy
Physica B284-288(2000)817-818.
- Yoshiaki Hashimoto, Shingo Katsumoto, Chizuko Murayama, Yasuhiro Iye
Spin Diffusion Length and Giant Magnetoresistance in Spin-Valve Tri-layers
Physica B284-288(2000)1247-1248.
- Takashi Hayashi, Shingo Katsumoto, Yoshiaki Hashimoto, Akira Endo, Minoru

Kawamura, Maxim Zalalutdinov and Yasuhiro Iye
 Anisotropy and Barkhausen Jumps in Diluted Magnetic Semiconductor (Ga, Mn)As
 Physica B284-288 (2000) 1175-1176.

A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye and H. Munekata
 Staircase-like Hysteresis Loop in ν -V Compound Diluted Magnetic Semiconductor (In, Mn)As at Low Temperatures
 Physica B284-288 (2000) 1173-1174.

T. Hayashi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto and Y. Iye
 Effect of Low Temperature Annealing on the Transport and Magnetism of Diluted Magnetic Semiconductor (Ga, Mn)As
 Appl. Phys. Lett., 78 (2001) 1691-1693.

A. Endo and Y. Iye
 Magnetoresistance of Lateral Hyperlattice : Independent Control of Spacing and Phase of Commensurability Oscillation
 J. Phys. Soc. Jpn. 69 (2000) 3656-3659

A. Endo and Y. Iye
 Novel Structures near $\nu=9/2$ in Short Period Lateral Superlattices
 Solid State Commun. 117 (2001) 249-254.

A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye
 Envelope of Commensurability Magnetoresistance Oscillation in Unidirectional Lateral Superlattices
 Phys. Rev. B62 (2000) 16761-16767.

A. Endo, M. Kawamura, S. Katsumoto and Y. Iye
 Magnetotransport of $\nu=3/2$ Composite Fermions under Periodic Effective Magnetic-Field Modulation
 Phys. Rev. B63 (2001) 113310-1-4.

H. Fujioka, S. Katsumoto and Y. Iye
 Detection of Edge-Conducting Channels in Quantum Hall Systems Using a Single Electron Transistor
 Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 2073-2076.

Ki-Dong Lee, Takushi Iimori and Fumio Komori
 Magnetic Properties of Co Dot Arrays Grown on the N-Modified Cu(001) $\sqrt{2} \times \sqrt{2}$ Surface
 Surf. Sci., 454-456 (2000) 860-864.

K. Mukai, Y. Matsumoto, K. Tanaka and F. Komori
Self-Organized Structure in Co Thin Film Grown on α -(2x2)-N-Cu(100) Surfaces
Surf. Sci., 450 (2000) 44-50.