

「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11年度に進展のあった主な点は以下の通りである。(1)空間変調磁場中の2次元電子系における電子電子ウムクラップ散乱の効果の定量的評価を行い理論と比較した。(2)M B E 生長した希薄磁性半導体の膜質が低温熱処理効果によって劇的に改善されることを発見した。これを用いて強磁性発現機構を探る実験や特異な金属非金属転移に対する系統的な実験が可能となった。(3)単電子トランジスタを用いて2次元電子の局所電気化学ポテンシャルを測定する方法を開発し、量子ホール効果のエッジ状態に関する知見を得た。(4)超伝導ネットワークに微小磁性体を付加した系における超伝導転移を調べた。(5)表面自己形成を利用してナノスケールの磁性体規則配列を作製し、原子層の増加に伴う磁性の変化を調べた。これらの成果を踏まえて今後さらに研究を発展させる。

2. 研究実施内容

A. 半導体 2 次元電子系における量子伝導

空間変調磁場中の 2 次元電子系

GaAs/AlGaAs 2 次元電子系試料の表面に微細構造の強磁性体を付加した系を用いて空間変調磁場中の電子輸送現象を調べた。特に一様成分がゼロの1次元周期磁場を印加した場合に、電気抵抗に T^2 に比例する項が現われることを見出し、これが磁気超周期を導入したことによる電子電子ウムクラップ散乱の効果であることを、電子温度依存性や変調方向と電流との相対角度依存性を調べることにより実証した。この現象に関して、佐々木・福山によって展開されている理論と定量的比較を行い良い一致を見た。

単電子帯電効果と干渉効果

アハラノフ・ボーム (A B) リングに量子ドットを埋め込んだ構造を作成し、単電子トンネルによるクーロン振動と電子波干渉による A B 振動の観測を行っている。単電子帯電効果を電子系の正確な1次温度計として用い、最近重要な

問題となっている位相コヒーレンス長の低温での飽和現象について、より確かな検証（あるいは反証）を与えることを目的として実験を行った。A B効果とクーロン振動を全く同じゲート条件下で同時に測定することができていないため、最終的な結論には至っていないが、飽和現象が電子系の温度上昇によるものである可能性を示唆する結果を得た。またこの系を用いて、干渉効果により局在状態が形成される際に単電子トンネルがどのような影響を及ぼすか、また、量子ドット内の多電子状態が干渉効果にどのような影響を及ぼすかを調べることを目標としている。

量子ホール効果のエッジ状態

量子ホール状態では2次元電子のバルク状態は局在しエッジ状態がホール電流を担うという描像が成立する。このエッジ状態の詳細を調べる試みは数多く行われているが、今回われわれは単電子トランジスタを高感度エレクトロメーターとして利用することにより電気化学ポテンシャルを測定する手法を開発した。サイドゲートを用いて単電子トランジスタに対するエッジ状態の位置を動かすことによって、エッジ状態のプロファイルに関する情報を得ることができる。量子ホール状態にある2次元電子層を重ねた多層量子ホール系における垂直伝導は、バルク2次元電子が局在する極低温域では、エッジ状態の層間結合によって形成されるカイラル表面状態によって担われると考えられている。この領域において顕著な非線形伝導現象を見出された。また、平行磁場によって垂直伝導度が大きく減少することが見出された。この原因として、カイラル表面状態に対する磁気抵抗効果と平行磁場による層間ホッピング抑制の2つの機構が考えられるが、後者が支配的と考えられる。

B. 希薄磁性半導体の磁性と伝導

低温熱処理効果

(Ga,Mn)As, (In,Mn)AsなどIII-V族をベースとする希薄磁性半導体は磁性とエレクトロニクスを結合したいいわゆるスピントロニクスの素子材料として注目されている。これらの材料は、以前はMnの固溶限界から合成が難しいとされたが、低温MBEによって薄膜成長が可能になった。しかし、その品質はAsのビーム強度などの成長条件に極めて敏感であり、さらに成長後も加工時のプロセスによって変化しやすい不安定なものである。われわれは成長後の低温熱処理によって、転移温度、電気伝導度などが劇的に改善される上、その後の加工プロセスにおける熱処理に対しても安定性が向上することを見出した。

熱処理温度や時間により、単一試料について電気伝導度や強磁性転移温度をある範囲で制御できるため、これまで成長条件に対する敏感性のために困難で

あった系統的な実験や、精密なパラメーター制御を必要とする実験が可能となる。赤外から遠赤外領域の光学伝導度スペクトルや軟X線ラマン散乱の実験から、磁性に深く関わっている正孔がMnのd軌道的性格を持つことが明らかになりつつあり、強磁性の起源として二重交換相互作用による機構が有力と考えられる。また、この手法を用いて金属絶縁体転移直近の試料を作製し、外部磁場による磁場誘起金属絶縁体転移を調べた。

C. 表面ナノ構造における磁性と伝導

表面超薄膜ナノ構造磁性体の研究

超高真空中の固体清浄表面上において結晶成長の特性を利用することにより、結晶構造が明確な超薄膜金属やナノ構造金属磁性体を作製することができる。窒素吸着Cu(100)面に自己形成される正方格子状のナノ構造パターンを利用してCo微粒子の2次元規則配列を実現し、その磁性を調べた。第2原子層のCoが各微粒子で成長し、隣の微粒子との間隔が狭くなったところで強磁性が出現することなどが見出され、ナノスケールにおける磁気相互作用に関する知見を得た。

金属強磁性体原子ワイヤーの量子化電気伝導

原子サイズの金属ワイヤーの電気伝導は、細線部の伝導チャンネルの数と各々のチャンネルの透過確率によって決定される。金属磁性体の原子ワイヤーにおいて、スピンバンドの分裂がこれにどのように反映されるかに興味が集まっている。われわれは極低温超高真空中で安定な強磁性体原子ワイヤーを作製し、その電気伝導を調べた。清浄なFe薄膜表面にSTM探針を接触させた後、引き離すと、破断寸前にFe原子ワイヤーが形成される。探針の位置を止めた状態は長時間安定であり、原子ワイヤーの電気伝導度を伸張・収縮を繰り返しながら測定することができる。その結果、強磁性体で期待されるように、電気伝導度の量子化単位が非磁性の金属の場合の $2e^2/h$ と比べて約半分になっていることが観測された。また、数多くの測定のなかには、 e^2/h の電気伝導度の跳びが、原子ワイヤーの微量の伸張・収縮に伴ってヒステリシスをもって再現する例が観測された。この現象の起源として、原子の位置にヒステリシスがある、あるいは、磁性状態にヒステリシスがある、などいくつかの解釈が可能である。

D. 微小領域の超伝導と磁性

空間変調磁場中の超伝導ネットワーク

2次元正方格子の超伝導(Nb)ネットワークに微小磁性体(Dy)を付加した系を作成し、ネットワークに空間交番磁場(チェッカーボード磁場)をかけた場合の超伝導転移の様子を調べた。この系のリトル・パークス振動が一樣磁場

およびチェッカーボード磁場の関数として変化する様子を観測した。これに対応するモデルのホフスタッター・バタフライ・ダイアグラムを計算した結果と比較することにより,チェッカーボード磁場が単位胞あたり1/4磁束量子の時に一様磁場に対するリトルパークス振動の周期が半分になること,1/2磁束量子の時に一様磁場ゼロと1/2磁束量子の状態が入れ替わること,などを見出した

3 . 主な研究成果の発表 (論文発表)

A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye, H. Munekata and H. Ohno: Magnetic and Transport Properties of Ferromagnetic Semiconductor Heterostructures (In,Mn)As/(Ga,Al)Sb Phys. Rev. B59 (1999) 5826-5831

M. Kato, A. Endo, M. Sakairi, S. Katsumoto and Y. Iye: Electron-Electron Umklapp Process in Two-Dimensional Electron Gas under a Spatially Alternating Magnetic Field J. Phys. Soc. Jpn. 68 (1999) 1492-1495.

Y.Iye, A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, F.Matsukura, A.Shen, H.Ohno and H. Munekata: Metal-Insulator Transition and Magnetotransport in III-V Compound Diluted Magnetic Semiconductors Mat. Sci. and Eng. B63 (1999) 88-95.

M.Kawamura, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye: Strong Non-Ohmicity in the Vertical Transport in Multilayered Quantum Hall System J. Phys. Soc. Jpn., 68 (1999) 2186-2189.

S.Katsumoto, H.Sato and Y.Iye: Duality between Single Electron Phenomena and Flux Quantization in Mesoscopic Superconductors Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) 350-353.

M.Kato, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye: Transverse Resistivity in Two-Dimensional Electron Gas in an Oblique Lateral Magnetic Superlattice J. Phys. Soc. Jpn., 68 (1999) 2870-2871.

M.Zalalutdinov, H.Fujioka, Y.Hashimoto, S.Katsumoto and Y.Iye: Magnetic Flux Configuration in Mesoscopic Superconductor Probed by Scanning Tunneling Spectroscopy J. Phys. Soc. Jpn., 68 (1999) 2872-2873

S.Ito, M.Ando, S.Katsumoto and Y.Iye: Superconducting Network in Spatially Modulated Magnetic Field --- Hofstadter-Type Problem in Checkerboard Field J. Phys. Soc. Jpn., 68 (1999) 3158-3161.

M.Ando, S.Ito, S.Katsumoto and Y.Iye: Hofstadter Butterfly in Checkerboard Field J. Phys. Soc. Jpn., 68 (1999) 3462-3463

S.Katsumoto, H.Sato and Y.Iye: Duality between Single-Electron Phenomena and Flux Quantization in Mesoscopic Superconductors Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) 350-353.

F. Komori, K. Kushida, K.Hattori, S. Arai and T. Iimori: Growth of Ag Island on Ge(001)-2x1 surfaces below room temperature Surf. Sci. 438 (1999) 123.

F.Komori and K.Nakatsuji Quantized Conductance through Atomic-Sized Iron Contacts at 4.2 K J. Phys. Soc. Jpn. 68 (1999) 3786-3789.

M.Kawamura, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye Non-Ohmic Vertical Transport in Multilayered Quantum Hall Systems Physica E6 (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 E6 (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.

家 泰弘 非一様磁場中での量子輸送 固体物理 34 (1999) 359-366.

家 泰弘 磁性体 / 半導体複合微細構造における電気伝導 日本応用磁気学会第111回研究会資料(1999) p.33-40.