

「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10年度に進展のあった主な点は以下の通りである。(1)メゾスコピック磁性体配列によって作り出す空間変化磁場中での2次元電子系の振る舞いを調べ、電子電子散乱の効果を定量的に評価する手法を開発した。(2)希薄磁性半導体における特異な金属非金属転移およびその近傍で見られる巨大磁気抵抗効果において結晶成長時に導入される歪みによる(001)面内異方性が重要な役割を果たすことを明らかにした。(3)微小超伝導体の振る舞いを超伝導単一トランジスタや低温STMを用いて調べ、少数量子磁束系特有の磁束状態の反映する結果を得た。(4)超伝導体表面に磁性微粒子を付加した系について低温STMを用いたトンネル分光測定により局所対破壊効果に関する知見を得た。(5)表面自己形成によるナノスケール磁性体の作製と磁気光学効果測定法の開発を行った。これらの成果を踏まえて今後さらに研究を進展させる。

2. 研究実施内容

A. 微小領域における超伝導と磁性

微小超伝導体における少数磁束量子系

微小接合をもつ超伝導単一電子トランジスタ(SSET)の電流電圧特性に現れるギャップ構造を外部磁場の関数として追跡することにより、微小超伝導体を貫く磁束量子の数を異にする準安定状態間の遷移の様子を捉えることができた。微小超伝導リングに磁束量子が入り出すときに、dc-SQUIDの干渉パターンの位相に π だけの跳びが現れることを見いだした。これは量子ドットを持つABリングにおける電子波の位相がドット内電子数の変化に伴って π だけ変化するというYacobiらの実験において電子を磁束量子で置き換えたものに相当している。

微小超伝導体における少数磁束系の振る舞いに関して、微小超伝導体が単連結の場合と多重連結の場合の違いが明瞭に観測された。磁束量子が少数の場合、アプリ

コソフ磁束格子的状态と巨大磁束状态との間の移り変わりが理論計算から予想されている。このような微小超伝導体における磁束の空間配置に関する情報を得るべく、低温 STM を用いた局所トンネル分光の測定を行い、インジウムの微小円板試料におけるギャップの空間変化の様子を捉えることができた。

微小磁性体による表面付近の超伝導の破壊

超伝導体である 2H-NbSe₂ の上に鉄を微量蒸着し、表面に形成された島状の微少な鉄微粒子極近傍の超伝導破壊の様子を超高真空極低温 STM を用いてトンネル分光によって調べた。鉄微粒子の近くでは超伝導ギャップ内に準粒子束縛状態が観測され、理論的予想と一致する結果を得た。

B. 半導体系における量子伝導と磁性

空間変調磁場下の 2 次元電子系

GaAs/AlGaAs 半導体ヘテロ構造の表面に微細構造強磁性体を付加した系を用いて空間変化する磁場中での 2 次元電子系の伝導現象を調べた。外部磁場を 2 次元面に平行にしたときに実現される空間交番磁場の状況では、磁気超周期の印加によって電子電子散乱のウムクラップ過程が電気抵抗に寄与するようになり、電気抵抗に T^2 -項が現れることを見いだした。これが実際、電子電子散乱の効果であることを、バイアス電流によって電子温度のみを上昇させた実験によって実証した。またウムクラップ広報散乱が効いていることを実証する異方性を観測した。同様の効果は静電ポテンシャル変調でも起こるが、磁場変調を用いることは電子密度一定で長周期ポテンシャルを変えられるという特徴を持つ。この系では主なパラメータの値が正確に決められるので、第一原理からの計算との定量的な比較が可能である。

希薄磁性半導体における磁性と伝導

MBE によって成長した希薄磁性半導体(Ga,Mn)As において面内磁場と電流の相対方向に依存するいわゆる異方性磁気抵抗効果を観測し、それが結晶の方位 ([110] と $[1\bar{1}0]$) に強く依存することを見いだした。極低温におけるホッピング伝導も強い異方性を持つことが見いだされており、これらはこの系の非平衡結晶成長時の歪みを反映したものと推測される。また(In,Mn)As や(Ga,Mn)As の極低温における異常ホール効果のヒステリシスループに不連続な跳び (巨大バルクハウゼン効果) が現れることを見いだした。

C. 金属表面・界面における磁性

銅(100)表面上のコバルト、鉄微小ドットの作製とカー効果による測定

清浄な銅(100)表面上で適度な窒素処理を行うと、一辺約 5nm の正方形の $c(2 \times 2)$ -N 構造のパッチが正方格子状に規則正しく配列する。パッチとパッチの間には、清浄な銅表面が残り、その幅は数原子幅から 10 原子幅まで窒素量によって変化する。この構造の上にコバルトを少量蒸着すると、コバルトは清浄な銅の表面

のみに吸着し、 $c(2 \times 2)$ -N 構造のパッチの上には吸着しない。コバルトの量が増え
ても、細長い銅の清浄表面上には単原子層以上のコバルトは成長せず、余分なコバ
ルトは銅が広く露出している交差点部で第2原子層として成長する。このコバルト
ドット配列が形成されている表面での磁気ヒステリシス曲線の測定を温度 450K か
ら 95K の間で行った。一様なコバルト薄膜と強磁性転移や磁化曲線が異なってお
り、その平均膜厚と温度依存性を系統的に調べた。

磁性・非磁性金属多層膜におけるスピン拡散長

磁性金属から非磁性金属へのスピン分極の拡散に関する知見を得る目的で、
Fe/Cu/Ni 三層構造においてCu層厚を細かく変えた一連の試料を作製し、巨大磁
気抵抗効果の温度変化および膜厚依存性を系統的に調べた。その解析からCu中の
スピン拡散長に関する情報を得た。

3. 主な研究成果の発表 (論文発表)

- A.Oiwa, S.Katsumoto, A.Endo, M.Hirasawa, Y.Iye, H.Ohno, F.Matsukura,
A.Shen, and Y.Sugawara,
Giant Negative Magnetoresistance of (Ga,Mn)As/GaAs in the Vicinity of a
Metal-Insulator Transition,
Phys. Stat. Sol. (b) 205 (1998) 167-171.
- S.Katsumoto, A.Oiwa, Y.Iye, H.Ohno, F.Matsukura, A.Shen, and Y.Sugawara,
Strongly Anisotropic Hopping Conduction in (Ga,Mn)As/GaAs,
Phys. Stat. Sol. (b) 205 (1998) 115-118.
- M. Hirasawa, S. Katsumoto and Y. Iye,
Coulomb Blockade in Arrays of Quantum Dots,
Physica B249-251 (1998) 252-256.
- M.Ando, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye,
Conduction Through Point Contact in Fractional Quantum Hall Liquid,
Physica B249-251 (1998) 426-429.
- T. Takamasu, G. Kido, M. Ohno, N. Miura, A. Endo, M. Kato, S. Katsumoto
and Y. Iye,
Possible Explanation of the High Temperature Extrapolated Value of Diagonal
Resistivity at $\nu = 1$ in terms of Skyrmion,
Physica B249-251 (1998) 391-394.
- M.Kawamura, A.Endo, M.Hirasawa, S.Katsumoto and Y.Iye,
Angular Dependent Magnetoresistance Oscillation in GaAs/AlGaAs Superlattice,
Physica B249-251 (1998) 882-886.

- M.Kato, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye,
Strain-Induced Potential Modulation versus Magnetic Field Modulation on
Two-Dimensional Electron Gas at the GaAs/AlGaAs Heterointerface,
Physica B249-251 (1998) 753-757.
- H.Sato, S.Katsumoto and Y.Iye,
Fluxoid States in Mesoscopic Superconductors,
Physica B249-251 (1998) 453-457.
- A.Oiwa, S.Katsumoto, A.Endo, M.Hirasawa, Y.Iye, F.Matsukura, A.Shen,
Y.Sugawara and H.Ohno,
Low Temperature Conduction and Giant Negative Magnetoresistance in III-V
Based Diluted Magnetic Semiconductor: (Ga,Mn)As/GaAs,
Physica B249-251 (1998) 775-779.
- A.Orito, A.Fukushima, S.Katsumoto and Y.Iye,
Microstructured Thin Films and Multilayers of Superconductor and
Ferromagnetic Metal,
Solid State Electronics, 42 (1998) 1481-1488.
- H.Sato, S.Katsumoto, and Y.Iye,
Non-Invasive Measurements of Mesoscopic Superconductors by Superconducting
Single Electron Transistors,
Solid State Electronics, 42 (1998) 1463-1466.
- M.Kato, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye,
Control of Magnetic Field Modulation on Two-Dimensional Electron Gas at
the GaAs/AlGaAs Heterointerface by Parallel Magnetic Field,
Solid State Electronics, 42 (1998) 1121-1124.
- M.Ando, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye,
Detection of Fractional Edge Channel by Quantum Point Contacts,
Solid State Electronics, 42 (1998) 1179-1182.
- M. Kato, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye,
Two-Dimensional Electron Gas under Spatially Modulated Magnetic Field ---
a Test Ground for Electron-Electron Scattering in Controlled Environment,
Phys. Rev. B58 (1998) 4876-4881.
- S.Koshihara, H.Munekata, A.Oiwa, M.Hirasawa, S.Katsumoto, Y.Iye, C.
Urano and H.Takagi,
Photocarrier Induced by Ferromagnetic Order in III-V-Based Magnetic
Semiconductor Heterostructures of (In,Mn)As/GaSb,

Physica E2 (1988) 417-420

- 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,
 - N.Akiba, F.Matsukura, N.A.Shen, Y.Ohno, H.Ohno, A.Oiwa, S.Katsumoto,
and Y.Iye,
Interlayer Exchange in (Ga,Mn)As/(Al,Mn)As/(Ga,Mn)As Semiconducting
Ferromagnet/Nonmagnet/Ferromagnet Structures,
Appl. Phys. Lett. 73 (1998) 2122-2124.,
 - 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.,
 - F.Matsukura, N.Akiba, A.Shen, Y.Ohno, A.Oiwa, S.Katsumoto, Y.Iye and
H.Ohno, Magnetotransport Properties of (Ga,Mn)As/GaAs/(Ga,Mn)As Trilayer
Structures,
J. Mag. Soc. Jpn., 23 (1999) 99-101.
 - S.Katsumoto, M.Kato, A.Endo and Y.Iye,
Electronic Transport under Spatially Modulated Magnetic Field,
Proc. 4th Int. Symp. On Advanced Physical Fields, ed. G.Kido (Tsukuba, Feb,
1999) p.65-68.
 - Y.Oikawa, T.Takamasu, G.Kido, A.Endo, M.Kato, S.Katsumoto and Y.Iye,
Effect of the Inner Current Contact in Quantum Hall Regime,
Proc. 4th Int. Symp. On Advanced Physical Fields, ed. G.Kido (Tsukuba, Feb,
1999) p.333-336.
 - 家 泰弘, 加藤 真由美, 遠藤 彰, 人工磁気周期構造と2次元電子系,
日本物理学会誌 53 (1998) 750-757
- 他3件