

東京大学物性研究所 教授

家 泰弘

「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

電子輸送と磁性は物性科学における2つの中心的な研究テーマである。それは、電荷とスピンという属性を持つ電子が固体中においてどのような集団としての性質を示すかという固体物理の基本問題であると同時に、現代文明を支える電子機器の中核をなす半導体デバイスや磁気デバイスの動作原理の物理的基礎をなすものである。伝導現象の研究と磁性研究とはそれぞれが大きな専門分野をなし、これまで独自の発展を遂げてきた。しかしながら近年、以下に述べるように磁性と密接に絡んだ伝導現象の研究が大きな進展を見せている。その中には新しい原理に基づく実用デバイスとして発展する可能性を秘めたものも少なくない。また基礎物性物理としても、このような研究を通じて積年の問題が新たな視点で見直されつつある。本研究プロジェクト「微細構造におけるスピン量子物性の開拓」では、金属や半導体の表面界面に形成される微細構造において展開される量子現象、なかでも特に、スピン自由度や磁性が関連した量子輸送現象を探究する研究を展開した。

本研究チームは東京大学物性研究所先端領域研究部門の家 泰弘、小森文夫、勝本信吾の3研究室による構成でスタートした。その後、本研究チームにポスドクとして参加していた八木隆多氏が平成12年度に広島大学低温センター助教授に着任したことに伴って、八木グループが独立のユニットとしてチームに加わることとなった。本プロジェクトでは、特定の物質を研究対象とするのではなく、むしろ興味ある物理現象ごとにそれが最も明瞭な形で現れる系を選択して実験をデザインするというアプローチを採った。取り組んだテーマは、実験手段の観点から量子伝導関係を表面関係の研究に大別され、前者を主として家・勝本グループが、後者を主として小森グループが担当した。表面関連の実験では、超高真空チャンバー内で系の作製から測定までを一貫してその場で行う必要があることから、実験手法に独特の制約があるためである。しかしながら、物理的には共通する問題も多く見出され、議論は緊密に行った。また、走査トンネル顕微鏡関連の測定や薄膜作製などに関しては技術情報の交換も頻繁に行った。

本研究プロジェクトで行った研究内容は以下の5つの大項目に整理することができる。

- [1] メゾスコピック構造半導体2次元電子系の量子輸送とスピン依存効果
- [2] 希薄磁性半導体の磁性と伝導
- [3] 表面ナノ構造磁性体の形成と磁性
- [4] メゾスコピック磁性体におけるスピン依存伝導
- [5] メゾスコピック超伝導体と磁性

これらのうち、[1][2]は家・勝本グループ、[3]は小森グループ、[4][5]はその中のサブテーマによって家・勝本・小森・八木が分担して研究を遂行した。

以下では上記の分類にしたがって、その研究内容と主な成果の概要を簡単に記す。

[1] メゾスコピック構造半導体 2次元電子系の量子輸送とスピン依存効果

周期磁場変調下の 2次元電子系の電気抵抗に現れる余剰抵抗が $\Delta\rho = AT^2 + C$ の温度依存性を示すことを見出し、 T_2 に比例する項が電子電子散乱効果に起因すること、定数項は残留抵抗をもたらす不純物散乱と変調磁場との複合効果であること、を明らかにした。

ランダウ準位占有率が $\nu=3/2$ 近傍の複合フェルミオン領域における磁気抵抗の整合振動（幾何学共鳴効果）を観測し、その共鳴条件の解析から $\nu=3/2$ 複合フェルミオンが完全スピン偏極しているとの結論を得た。また、超短周期変調をもつ量子井戸の量子ホール状態において $\nu = \text{奇数}$ のスピングャップが顕著に抑制される効果を見出した。

高次ランダウ準位の半占有状態におけるストライプ相（電荷密度波相）が短周期変調ポテンシャルによってどのような影響を受けるかを調べ、 $\nu=5/2$ から $25/2$ の広い範囲にわたってストライプ相の出現を示唆する磁気抵抗ピークを観測した。サイクロトロン半径と変調周期との整合関係がストライプ相の安定性に反映される様子が捉えられた。

制御用ゲート電極をもつアハラノフ・ボーム (AB) リングを作製し、通常の電極配置と、曲がり抵抗を測定するときのような非局所測定配置とによるふるまいの違いを調べた。(1) ゲート電圧を変えたとき前者では AB 振動の位相がロックされるのに対して、後者では連続的に変化させられること、(2) AB 振動の相対的振幅は後者のほうが大きく、かつ、(3) 温度を上げたときの減少（デコヒーレンス）も緩やかであること、を見出した。特に最後の点は、測定のプロブ配置によって電子のデコヒーレンスに違いが現れることを示す重要な結果である。

AB リングの一方のアームが量子ドットをもつ構造を作製し、AB 振動とクーロン振動の共存領域を調べた。この系のクーロン振動に、量子ドットの離散準位とリングの連続準位の共鳴によるファノ（共鳴）干渉パターンが現れることを見出した。クーロン振動の谷においても AB 振動が観測されたことは、ファノ干渉によって局在状態が解消したこと示している。ファノ効果はさまざまな物理過程において見出されているが、メゾスコピック構造での観測は初めてであり、しかもこの系は種々のパラメーターが制御できるという著しい特徴をもつ。

[2] 希薄磁性半導体の磁性と伝導

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) 成長後の低温熱処理によって膜質を大幅に向上し、かつ安定化することを見出した。高 Mn 濃度試料における膜質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、低温熱処理によって過剰 As が蒸発して欠陥が消失するというメカニズムが明らかとなった。さらに、この低温熱処理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。

希薄磁性半導体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った。赤外スペクトルで 200meV 付近に見出された線幅の広い吸収ピーク

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ーが局在傾向の強い性格を有していることがわかった。Mn2p 領域の軟 X 線吸収スペクトルは、強磁性 Mn²⁺ (d⁵) と常磁性 Mn²⁺ (d⁵) の 2 つの成分からなり、低温熱処理によって過剰 As が減少するとともに強磁性 Mn²⁺ の割合が相対的に増加する。また、常磁性 Mn²⁺ 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 As 正孔を介した運動交換相互作用が 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。

(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ふるまいが見られる。低温熱処理を利用して金属非金属転移直前に試料をチューニングし、磁場誘起非金属金属転移を、有限温度 2 パラメータ・スケール理論によって解析した。

【3】表面ナノ構造磁性体の形成と磁性

窒素吸着銅(100)表面に自己形成される 7 nm 間隔の正方格子状ナノ構造を利用して磁性ドット配列を作製する手法を開発し、Co、Fe 系についてその構造と磁性を調べた。(1) Co ドット配列の磁気転移温度および磁気異方性が一樣薄膜と異なるふるまいを示すこと、(2) それぞれが磁気ドット間の相互作用や窒素吸着面上での Co の磁性に起因していること、(3) Co ドット配列では面内磁化であるのに対して、Fe の場合には面直磁化であること、などを明らかにした。このようなナノスケール磁性ドット配列を高密度磁気メモリーに応用する可能性について民間企業との共同研究を進めている。

Pt (111) 清浄表面上にマグネタイトの単結晶薄膜を作製し、フェルヴェイ転移温度の上下でスピン分解光電子分光を行った。フェルヴェイ転移に伴うスピン分解電子状態密度の変化がフェルミ準位以下 1 eV 程度の範囲でのみ観測され、理論の予想と一致する結果を得た。

【4】メゾスコピック磁性体におけるスピン依存伝導

磁性金属(Fe)ナノワイヤーの量子化伝導を、極低温 STM を用いることにより準静的に調べた。スピン縮退が解けていることを反映して、常磁性金属で観測される量子化コンダクタンスに比べて量子化単位が半分であることを見出した。細線の伸び縮みに対してヒステリシスをもつ電気伝導の跳びが観測され、これと鉄の結晶格子間隔や構造の変化によって生じる磁性変化との関連について第一原理計算との比較が進んでいる。

【5】メゾスコピック超伝導体と磁性

微小超伝導体に磁場をかけたときの磁束系の状態を単電子トランジスタおよび低温 STM を用いて調べた。外部磁場の上げ下げに伴う磁束量子 1 本 1 本の出入りを単電子トランジスタを用いて検出し、超伝導体が単連結の場合とリング形状の場合の磁束系の挙動の

違いを捕らえた。超伝導微小円板の磁束状態を低温 STM により調べ、アブリコソフ格子状態から多数の磁束量子を抱える巨大渦糸状態への相転移を捉えた。

2次元正方格子超伝導ネットワークの一つおきのボンド上に微小磁性体を付加した系を作製して、チェッカーボード磁場下の超伝導ネットワークの転移を調べた。この系の超伝導相境界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、これに対応するモデルのホフスタッター・パタフライ・ダイアグラムと良く一致することを示した。

超伝導体(NbSe₂)表面上の磁性微粒子(Fe)近傍の極低温走査トンネル分光によって、超伝導/磁性界面の局所電子状態の変化を調べた。孤立した Fe 微粒子近傍でのトンネルスペクトルは、微粒子周囲に局在した準粒子束縛状態の存在を示した。

固体表面に排他的に形成される超電導体の候補として、Ge(001) 面上の銀超薄膜の研究を行った。室温基板上に蒸着すると3次元銀島と単原子厚さのナノ構造(2次元島)が形成されるが、低温基板への蒸着すると2次元島を選択的に作製できることがわかった。そこで超電導体の候補となる2次元島の形成過程を STM を用いて研究し、光電子分光によるその価電子帯と内殻の電子状態研究により、表面合金あるいは表面化合物の存在を示した。

以上述べたように本研究プロジェクトでは、2次元電子系およびそれに人工周期を付加した系、量子ドット、希薄磁性半導体、表面自己形成ナノ構造、金属ナノワイヤー、微細構造超伝導体などを対象として、それらにおける伝導と磁性とのさまざまな関わりを明らかにすることを目指し、いくつかの成果をあげることができた。本プロジェクトの研究活動は基礎物性物理の探求を主眼とするものであり、直接の応用は念頭に置いていなかったが、扱った系のいくつかのものは将来の応用への発展の可能性を秘めている。量子計算など未来の量子デバイスへの関心が高まっているが、そこでの最も基本的な問題は電子のデコヒーレンス機構を明らかにあうることである。この観点から、AB リング系で見出された「プローブ配置に依存するデコヒーレンス」はさらに追求すべきテーマである。量子ドット/AB リング系で見出されたファノ干渉効果は、コヒーレンスの制御という観点から応用的にも興味深い。半導体デバイスにおける磁性の利用という観点からは、将来のスピントロニクスを支える物質としての希薄磁性半導体が特に注目される。実際の応用に至るまでには物質科学的問題点が山積しているが、本研究で見出された低温熱処理効果は有力な手段となり得る。強磁性体微細構造を用いて作り出すメゾスコピック・スケール空間変化磁場中の電子のふるまいも半導体/磁性体複合デバイスへの発展の可能性を秘めている。ナノスケール構造や表面といった特殊状況での磁性の諸相の解明は、物質科学としての興味とともに磁気応用デバイスの将来発展の基礎としても重要である。

2. 研究構想

本研究プロジェクトをスタートするに際して全体目標としたのは、「金属や半導体の表面界面に形成される微細構造における量子現象、特にスピン自由度や磁性が関連した量子現象に着目して新奇な物性を開拓すること」であった。

2次元電子系およびそれに人工周期を付加した系、量子ドット、希薄磁性半導体、表面自己形成ナノ構造、金属ナノワイヤー、微細構造超伝導体などを対象として、それらにおける伝導と磁性とのさまざまな関わりを明らかにすることを目指した。基本方針として、試料はすべて自作することを旨とした。プロジェクト期間が5年間という比較的長期であることを生かして、短期的成果よりも長期的にチームの力を蓄えたいと考えたからである。

試料作製技術や測定技術に関しては、プロジェクト発足以前から培っていた実験諸技術、すなわち GaAs/AlGaAs 系の分子線エピタキシー成長、真空蒸着等による金属薄膜・多層膜作製、電子線描画による微細加工、超高真空表面関連実験技術、極低温・強磁場における伝導測定、走査プローブ顕微鏡、などにさらに磨きをかけると同時に、新たな人工構造作製、磁気光学による磁気測定、低温 STM、光電子分光などを適宜開発して研究の幅を広げたいと考えた。高エネルギー分光や赤外分光などについては専門家の協力を得ることとした。



プロジェクト採択とほぼ同時期に、物性研究所の移転計画が具体化し、5年間のプロジェクトの4年目の始めに当たる時期に六本木から柏への移転が予定されることとなった。このことはいろいろな意味で研究の進め方に制約を課し、頭の痛い問題であった。さらに、研究代表者が移転実行委員長を務めたため多大の時間と労力を取られる結果になった。しかしながら振り返ってみれば、柏での新しい実験環境が本研究プロジェクトを推進する上で大きなメリットをもたらした。移転前後に実験がストップしたが、移転後の立ち上げも順調に進み、柏で新たに得られた実験データがプロジェクト成果の主要部分を構成するこ

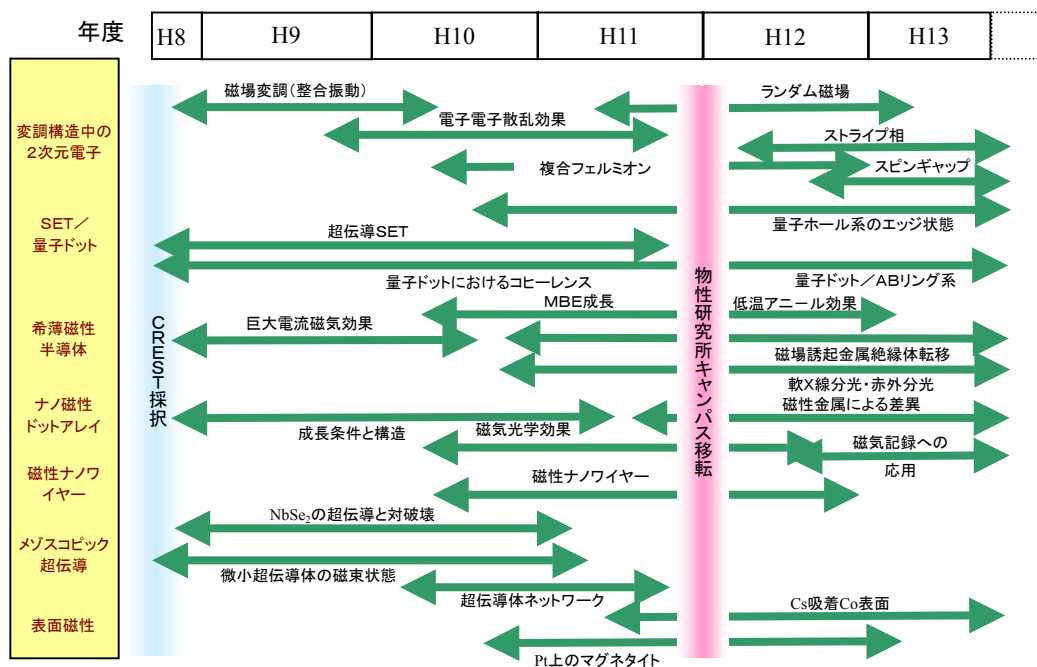
とになったのは、チームメンバーの奮闘のおかげと感謝している。

次節以降で詳しく述べるように、本プロジェクトで取り組んだ研究テーマは

- [1] メゾスコピック構造半導体 2次元電子系の量子輸送とスピン依存効果
- [2] 希薄磁性半導体の磁性と伝導
- [3] 表面ナノ構造磁性体の形成と磁性
- [4] メゾスコピック磁性体におけるスピン依存伝導
- [5] メゾスコピック超伝導体と磁性

という大項目に整理することができる。

個々のテーマへの取り組みは、チームメンバー特にポスドクや大学院生の異動による影響を少なからず受けたが、主要テーマに関しては概ね継続性を確保することができた。研究活動の年次進行の概要を下表に示す。



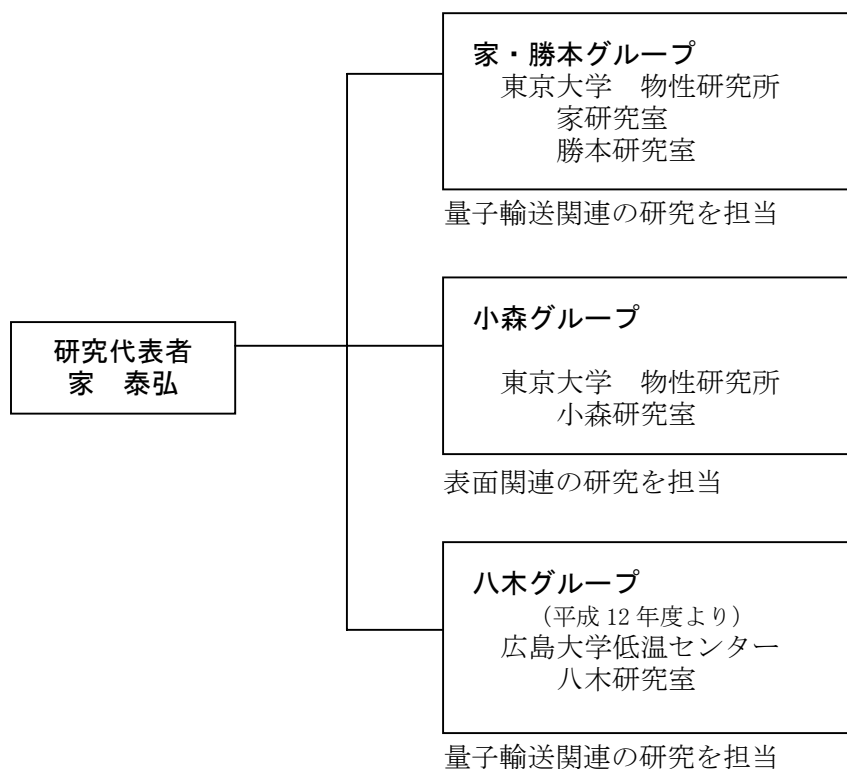
当初の研究構想で立てた研究計画は、テーマごとにその達成度に差はあるものの、全体としてはほぼ初期の目標を達したと考えている。しかしながら、当初の研究構想に含まれていたものの、その後の展開によって計画の変更を余儀なくされたテーマもいくつかある。以下はそのリストである。

- (1) 希薄磁性半導体に関しては、磁性と伝導の実験に加えて光学的測定によってスピンドYNAMICSを追うことを想定して準備を進めていたが、実際には(Ga, Mn)As自身はほとんど発光を示さないことがわかった。多層構造にしてスピンの情報を光学活性の層に引

き出すなどの戦略転換が必要であり、その方向で準備を進めている。

- (2) 微小磁性体の量子力学的ふるまい (MQTなど) の研究もプロジェクト開始当初のスコープに入れていた。希薄磁性半導体 (バルク) 試料が希釈冷凍機温度で巨大バルクハウゼンジャンプを示す現象を見出したが、熱的アヴァランシュ現象である可能性もあってMQTとの関係を明らかにする決め手を欠いた。研究担当者の異動もあってこのテーマは中途半端に終わってしまった。
- (3) InAs系半導体と強磁性金属の複合系におけるスピン注入実験も構想していたが、金属と半導体間の伝導度ミスマッチによる本質的困難がシュミット (Schmidt) らによって指摘されたこともあり、強磁性金属と半導体のハイブリッド構造はもっぱら磁場変調に利用することとして、スピン注入のための磁性体としては希薄磁性半導体を中心として考える方向に方針を転換した。
- (4) 磁性ドットアレイについても、時間分解分光実験を行ってスピンドYNAMICSを追うところまで進めたいと考えていたが、マンパワーの不足もあって目標達成には至らず、今後の課題として残されている。

3. 研究実施体制



4. ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成11年 11月12日	JST/CREST 家 研究 チーム研究会	東京大学 物性研究 所 (六本木)	54名	微細構造や表面におけるスピン自由度 ないしは磁性に関連した量子現象に関 して、(1) 空間変化磁場中の2次元電子 系、(2) 金属ナノワイヤーにおけるコン ダクタンス量子化、(3) 希薄磁性半導体、 の3テーマを選び、当グループの研究現 況の報告とともに、密接に関連する研究 を行っている研究者のご講演をいただ いき、討論を行った。
平成12年 10月23日 ～26日	The 8th NEC International Symposium on the Spin-Related Quantum Transport in Mesoscopic Systems	りんどう 湖国際ホ テル (那須)	40名	当事業主催ではないが、本研究に密接に 関連したテーマである「スピン関連伝導 現象」に関する下記の国際シンポジウム を本研究代表者である家が組織委員長 を務めて開催した。
平成13年 11月14日 ～16日	Yamada Conference LVII on Atomic-scale surface designing for functional low-dimensional materials	産業総合 研究所講 堂 (つくば)	150名	当事業主催ではないが、本研究および本 領域に密接に関係したテーマである「表 面低次元機能物質の創製と物性」に関す る国際会議を小森が事務局長を務めて 開催した。

5. 主な研究成果

(1) 原著論文等

- [1] A. Oiwa, S. Katsumoto, A. Endo, M. Hirasawa, Y. Iye, H. Ohno, F. Matsukura, A. Shen, and Y. Sugawara Nonmetal-Metal-Nonmetal Transition and Large Negative Magnetoresistance in (Ga, Mn)As/GaAs Solid State Commun., 103 (1997) 209-213.
- [2] S. Koshihara, A. Oiwa, M. Hirasawa, S. Katsumoto, Y. Iye, C. Urano, H. Takagi, and H. Munekata Fermagnetic Order Induced by Photogenerated Carriers in Magnetic III-V Semiconductor Heterostructures of (In, Mn)As/GaSb Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 4617-4620.
- [3] M. Kato, A. Endo and Y. Iye Profile of Periodic Potential Modulation Probed by Magnetoresistance Oscillation of a Two-Dimensional Electron Gas J. Phys. Soc. Jpn., 66 (1997) 3178-3182
- [4] F. Komori, T. Iwaki, K. Hattori, O. Shiino and T. Hasegawa New Superstructure on the Surface of 2H-NbSe₂ and Tunneling Spectra at 4.2K, J. Phys. Soc. Jpn. 66 (1997) 298.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] F. Komori, T. Iwaki, K. Hattori, O. Shiino and T. Hasegawa Tunneling Spectroscopy around the Boundary of a Small Impurity Phase on the Surface of 2H-NbSe₂ Appl. Phys. A66 (1998) S135

- [8] 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.
- [9] F. Komori, K. Hattori, T. Iwaki, Spatial Change of Tunneling Spectra around Small Iron Islands on Surfaces of Superconducting 2H-NbSe₂, J. Phys.Soc. Jpn. 67 (1998) 2614-2617.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] M. Hirasawa, S. Katsumoto and Y. Iye, Coulomb Blockade in Arrays of Quantum Dots, Physica B249-251 (1998) 252-256.
- [13] M. Ando, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye, Conduction Through Point Contact in Fractional Quantum Hall Liquid, Physica B249-251 (1998) 426-429.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] H. Sato, S. Katsumoto and Y. Iye, Fluxoid States in Mesoscopic Superconductors, Physica B249-251 (1998) 453-457.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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
- [24] 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
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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
- [30] 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
- [31] 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.
- [32] M. Ando, S. Ito, S. Katsumoto and Y. Iye: Hofstadter Butterfly in Checkerboard Field *J. Phys. Soc. Jpn.*, 68 (1999) 3462-3463
- [33] 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.
- [34] F. Komori, K. Kushida, K. Hattori, S. Arai and T. Imori: Growth of Ag Island on Ge(001)-2x1 Surfaces below Room Temperature *Surf. Sci.* 438 (1999) 123.
- [35] F. Komori and K. Nakatsuji Quantized Conductance through Atomic-Sized Iron Contacts at 4.2K *J. Phys. Soc. Jpn.* 68 (1999) 3786.
- [36] M. Kawamura, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye Non-Ohmic Vertical Transport in Multilayered Quantum Hall Systems *Physica E6* (2000) 698-701.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.

- [40] Masato Ando, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye Transport in Two-Dimensional Electron Gas in Inhomogeneous Magnetic Field *Physica B* 284-288 (2000) 1900-1901.
- [41] Maxim Zalalutdinov, Hiroyuki Fujioka, Yoshiaki Hashimoto, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye Vortex States in Microfabricated Superconducting Disk Probed by Tunneling Spectroscopy *Physica B* 284-288 (2000) 817-818.
- [42] Yoshiaki Hashimoto, Shingo Katsumoto, Chizuko Murayama, Yasuhiro Iye Spin Diffusion Length and Giant Magnetoresistance in Spin-Valve Tri-layers *Physica B* 284-288 (2000) 1247-1248.
- [43] 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 B* 284-288 (2000) 1175-1176.
- [44] A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye and H. Munekata Staircase-like Hysteresis Loop in III-V Compound Diluted Magnetic Semiconductor (In, Mn)As at Low Temperatures *Physica B* 284-288 (2000) 1173-1174.
- [45] 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.
- [46] 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
- [47] A. Endo and Y. Iye Novel Structures near $n=9/2$ in Short Period Lateral Superlattices *Solid State Commun.* 117 (2001) 249-254.
- [48] A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye Envelope of Commensurability Magnetoresistance Oscillation in Unidirectional Lateral Superlattices *Phys. Rev. B* 62 (2000) 16761-16767.
- [49] A. Endo, M. Kawamura, S. Katsumoto and Y. Iye Magnetotransport of $n=3/2$ Composite Fermions under Periodic Effective Magnetic-Field Modulation *Phys. Rev. B* 63 (2001) 113310-1-4.
- [50] 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.
- [51] Ki-Dong Lee, Takushi Iimori and Fumio Komori Magnetic Properties of Co Dot Arrays Grown on the N-Modified Cu(001) $c(2 \times 2)$ Surface *Surf. Sci.*, 454-456 (2000) 860-864.
- [52] K. Mukai, Y. Matsumoto, K. Tanaka and F. Komori Self-Organized Structure in Co Thin Film Grown on $c(2 \times 2)$ -N-Cu(100) Surfaces *Surf. Sci.*, 450 (2000) 44-50.
- [53] T. Hayashi, Y. Hashimoto, S. Yoshida, S. Katsumoto and Y. Iye Control of material parameters and metal-insulator transition in (Ga, Mn)As *Physica E* 10 (2001) 130-134.
- [54] S. Katsumoto, T. Hayashi, Y. Hashimoto, Y. Iye, Y. Ishiwata, M. Watanabe, R. Eguchi, T. Takeuchi, Y. Harada, S. Shin and K. Hirakawa Magnetism and Metal-Insulator Transition in III-V Based Diluted Magnetic Semiconductors *Mat. Sci. and Eng.*, 84 (2001) 88-95.
- [55] A. Endo, M. Kato, M. Kawamura, M. Ando, S. Katsumoto and Y. Iye Two-Dimensional Electrons in Spatially Inhomogeneous Magnetic Field *Mat. Sci. and Eng.*, 84 (2001) 37-43.
- [56] F. Komori and K. Nakatsuji Quantized Conductance through Ion Point Contacts *Mat. Sci. and Eng.*, 84 (2001) 102-106.
- [57] F. Komori, K.D. Lee, K. Nakatsuji, T. Iimori, and Y.Q. Cai: Growth and magnetism of Co nanometer-scale dots squarely arranged on a Cu(001)- $c(2 \times 2)$ N surface, *Phys. Rev. B* 63

- (2001) 214420(8).
- [59] S. Ohno, K. Nakatsuji and F. Komori: Growth of ferromagnetic dot arrays on Cu(001) c(2x2) N surfaces, *Surf. Sci.* 493 (2001) 539-546.
- [60] S. Katsumoto, T. Hayashi, Y. Hashimoto, Y. Iye, Y. Ishiwata, M. Watanabe, R. Eguchi, T. Takeuchi, Y. Harada, S. Shin, and K. Hirakawa Nature of MAGnetism in III-V based Diluted Magnetic Semiconductors Proc. 10th Int. Conf. on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy Phenomena, Physics and Applications, IPAP Conference Series 2, (2001) 261-264.
- [61] Y. Iye, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Ohno, S. Shimomura and S. Hiyamizu Magnetotransport in Short Period Lateral Superlattices Proc. 10th Int. Conf. on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy Phenomena, Physics and Applications, IPAP Conference Series 2, (2001) 25-28.
- [62] M. Hara, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye Transport in Semiconductor/Ferromagnet Hybrid Systems Proc. 10th Int. Conf. on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy Phenomena, Physics and Applications, IPAP Conference Series 2, (2001) 96-98.
- [63] Y.H. Matsuda, T. Ikaida, N. Miura, Y. Hashimoto, S. Katsumoto, J. Kono, M.A. Zudov and H. Munekata Hole Cyclotron Resonance in In_{1-x}Mn_xAs Proc. 10th Int. Conf. on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy Phenomena, Physics and Applications, IPAP Conference Series 2, (2001) 93-95.
- [64] Y. Iye, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Ohno, S. Shimomura and S. Hiyamizu Suppression of Exchange Enhancement of Spin Gap in Quantum Hall Systems by Ultra-Short Period Lateral Superlattice *J. Phys. Chem. Solids*, (2002), in print.
- [65] T. Hayashi, Y. Hashimoto, S. Katsumoto and Y. Iye Metal-Insulator Transition in (Ga, Mn)As *J. Phys. Chem. Solids*, (2002), in print.
- [66] H. Fujioka, A. Endo, S. Katsumoto and Y. Iye Observation of Edge States in Fractional Quantum Hall Effect *J. Phys. Chem. Solids*, (2002), in print.
- [67] K. Kobayashi, H. Aikawa, S. Katsumoto and Y. Iye Observation of an Enhanced Aharonov-Bohm Effect *J. Phys. Chem. Solids*, (2002), in print.
- [68] M. Hara, A. Endo, S. Katsumoto, and Y. Iye Magnetotransport in 2DEG with Magnetic Barriers *Physica E*, (2002), in print.
- [69] Y. Iye, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Ohno, S. Shimomura and S. Hiyamizu Magnetotransport in Ultrashort Period Unidirectional Lateral Superlattices *Physica E*, (2002), in print.
- [70] Y. Iye, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Ohno, S. Shimomura and S. Hiyamizu Quantum Transport in Two-Dimensional Electron Gas in Ultra-Short Period Lateral Superlattices Proc. 7th Int. Symp.on the Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (World Scientific), in print.
- [71] K. Kobayashi, H. Aikawa, S. Katsumoto and Y. Iye Observation-Dependent Decoherence in an Aharonov-Bohm Effect Proc. 7th Int. Symp.on the Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (World Scientific), in print.
- [72] Y.Q. Cai, K. Nakatsuji, S. Ohno, T. Imori, M. Yamada and F. Komori Direct Evidence for Itinerant Magnetite above and below the Verwey Transition Temperature, *Surf. Rev. and Lett.* (2002), in print.

- [73] M.C. Xu, T. Iimori, K.D. Lee and F. Komori Magnetic Anisotropy of Cs-Adsorbed fcc Thin Films on Cu(001) Surfaces, Surf. Sci. (2002), in print.
- [74] K. Nakatsuji, M. Yamada, S. Ohno, Y. Naitoh, T. Iimori, T. Okuda, A. Harasawa, T. Kinoshita and F. Komori Electronic Structure of Ag Thin Films on Ge(001) Surfaces Surf. Rev. and Lett. (2002), in print.
- [75] K. Kobayashi, H. Aikawa, S. Katsumoto and Y. Iye Tuning of the Fano Effect through a Quantum Dot in an Aharonov-Bohm Interferometer submitted to Phys. Rev. Lett.
- [76] K. Kobayashi, H. Aikawa, S. Katsumoto and Y. Iye Probe-Configuration-Dependent Decoherence in an Aharonov-Bohm Ring submitted to Phys. Rev. Lett.
- [77] F. Komori, S. Ohno and K. Nakatsuji Arrays of Magnetic Nanodots on Nitrogen-Modified Cu(001) Surfaces, submitted to J. Phys. C (invited review paper)
- [78] Y. Naitoh, K. Nakatsuji and F. Komori Correlated Motion of Small Ag Clusters and Ge Dimer Buckling on Ge(001), submitted.
- [79] Y. Naitoh, K. Nakatsuji and F. Komori Formation Process of Very Thin Ag Structures on Ge(001) Surfaces, submitted.

(2) 特許出願（国内 1 件、海外 0 件）

発明者 : 勝本信吾、家 泰弘、林 岳、橋本義昭

発明の名称 : 磁性半導体薄膜の製造方法

出願人 : 川崎雅弘

出願番号 :

出願日 : 平成12年 9 月 13 日

(3) 受賞、新聞報道等

該当なし