

2-1 微細構造におけるスピン量子物性の開拓 家 泰弘 (東京大学物性研究所)

量子ドットを埋め込んだアハラノフ・ボーム(A B)リングにおいてファノ干渉効果を観測した。周期変調を付加した2次元電子系における量子輸送を調べ、電子電子散乱効果、量子ホールスピギャップの抑制効果、複合フェルミオンのスピン偏極、高次ランダウ準位におけるストライプ相の安定化など、を明らかにした。III-V族希薄磁性半導体の低温熱処理効果を発見し、それを利用してこの系における磁場誘起金属非金属転移の詳細な研究を行った。窒素吸着銅表面に自己形成されるナノ構造を利用して磁性ドット規則配列を製作し、その磁性を明らかにした。

Spin Quantum Phenomena in Nanostructures Yasuhiro Iye (University of Tokyo)

Fano interference effect has been observed in Aharonov-Bohm ring with embedded quantum dot. Study of quantum transport phenomena in two-dimensional electron systems subjected to periodic modulation has revealed electron-electron scattering effect, suppression of quantum Hall spin-gap, spin polarization of composite Fermions, and stabilization of stripe phase at higher Landau levels. Low-temperature annealing process has been found to improve drastically the quality of III-V compound based diluted magnetic semiconductor thin films, and has been used for detailed study of magnetic-field-induced metal-insulator transition in this system. Well-ordered arrays of ferromagnetic dots have been fabricated by use of self-organized nano-scale structure on the surface of nitrogen adsorbed surface of copper, and their magnetic properties have been elucidated.

1. 研究テーマ

微細構造におけるスピン量子物性の開拓

研究代表者： 家 泰弘（東京大学物性研究所）

2. 研究の概要

2-1 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。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ったが、扱った系は将来の応用への発展の可能性を秘めているものである。半導体における磁性という観点からは、特に将来のスピン트로ニクスを支える物質としての希薄磁性半導体が注目される。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。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。

2-2 研究体制

本研究チームは東京大学物性研究所の家・小森・勝本の3研究室で構成されるグループとしてスタートし、人事異動に伴って平成12年度から広島大学低温センターの八木研究室が加わった。量子輸送関係の研究は主として家・勝本グループおよび八木グループが、表面関係の研究は主として小森グループが担当している。事業団雇用のポスドク研究員は通算7名（内、外国人4名）が参加し、それぞれ重要な貢献を残した上で、次のステップの研究職に就いている。プロジェクト期間中、通算23名の大学院生が研究に参加し、4名が博士号、17名が修士号を取得して、それぞれ次の活躍の場に進んでいる。また、物性研究所の福山秀敏教授、安藤恒也教授、田中虔一教授（現：埼玉工大）、辛埴教授、常行真司助教授、東大生産技術研究所の平川一彦教授、東北大通研の大野英男教授、東北大金研の高梨弘毅教授、東工大工学系研究科の宗片比呂夫教授、腰原伸也教授、阪大基礎工学研究科の冷水佐寿教授、阪大工学系研究科の笠井秀明教授、北大工学系研究科の明楽浩史助教授の諸氏には研究のさまざまな局面でご協力をいただいた。

2-3 研究成果

(A) 半導体2次元電子系における量子伝導

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。磁場変調は、静電ポテンシャル変調と違って遮蔽効果が無視できるため、変調の強さを正確に把握できるという利点があり、電子電子散乱に関して理論との定量的比較が可能なモデル系を提供するものである。

周期変調系の輸送現象から量子ホール系のスピン状態に関する知見を得た。ランダウ準位充填率が $\nu=3/2$ 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完全スピン偏極しているとの結論を得

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 $\nu =$ 奇数のスピギ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によってストライプ相の安定性に変化が起こることを示唆する結果を得た.

単電子トランジスタを2次元電子系の表面に作製し, これを化学ポテンシャルの局所プローブとすることにより, 分数量子ホール効果のエッジ状態を検出した.

(B) ABリングと量子ドットにおける電子のコヒーレンス

一部に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電子のコヒーレンスの違いを見出した. 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を見出した. またAB振動の相対的振幅は後者のほうが大きく, かつ温度を上げたときの減少も緩やかであることを見出し, 電極配置によって電子のコヒーレンスの現われ方に違いが生ずることを示した.

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. コヒーレンスの強いところではクーロンピークがディップに変化する様子も見られた. ファノ干渉はさまざまな物理過程において見出されているが, 今回の観測はあらゆる測定を通じてこれまでで最も完全なファノ干渉の検証であり, またパラメータ領域をゲートと磁場という外部パラメータで制御できるという点でも画期的な成果である.

(C) 希薄磁性半導体における磁性と伝導

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 100meV 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. Mn2p 領域の軟X線吸収スペクトルは, $Mn^{2+} + As4p$ 正孔 (d^5L) と Mn^{2+} (d^5) の2つの成分からなり, 低温熱処理によって後者の強度が減少する傾向が観測された. これは過剰 As の減少に伴って d^5L の割合が相対的に増加したことを示し, d^5L 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.

(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・スケーリング理論によって解析した. Mn 濃度低濃度側での金属絶縁体転移(MIT-1)と高濃度側での転移(MIT-2)の性質の違いを明らかにすることは, (Ga, Mn)As の磁性の機構を知る上で重要であるばかりでなく, 高濃度ドープ半導体の MIT で従来から大きな

問題となっている臨界指数の問題に重要なヒントを与えるものと考え研究を進めた。MIT-1では2パラメータ・スケーリングにのるパラメータ領域がかなり狭いのに対して、MIT-2では実験可能な磁場範囲(15T以下)全域で2パラメータ・スケーリングでフィットできることを見出した。このことは、MIT-1と強磁性の発現が、一方が他方の原因になるという単純な因果関係で結ばれるものではなく、機構的に密接に関係しており、これは、もっとも単純なRKKY型強磁性を否定するということである。もう一つは、MIT-1のように電子相関が重要な働きを担うMITにおいては、2パラメータスケーリングは何らかの変更を求められる、ということで、これはまた転移点ぎりぎり近傍まで相関が重要になる補償の極めて少ない不純物半導体の場合、特異な臨界指数が現れるという可能性も示唆している。

(D) 表面ナノ構造における磁性と伝導

窒素吸着銅(100)表面に自己形成される7nm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。Coドット配列の磁気転移温度および磁気異方性が一様薄膜と異なるふるまいを示すことを見出し、そ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を明らかにした。また、Coドット配列では面内磁化であるのに大して、Feの場合には面直磁化である。規則配列形成の機構を調べるため、Feを少量蒸着した表面のSTM観察を行い、表面での原子置換によりFe微粒子の核形成が生じていることを明らかにした。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1eV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。

磁性金属(Fe)ナノワイヤーの量子化伝導を、極低温走査トンネル顕微鏡を用いることにより静的に調べた。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を理論的に調べている。

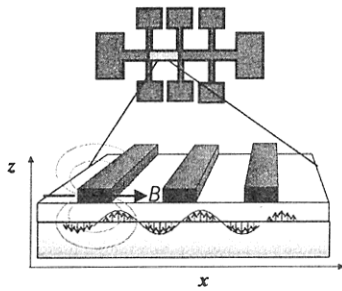
(E) 微小領域における超伝導と磁性

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。

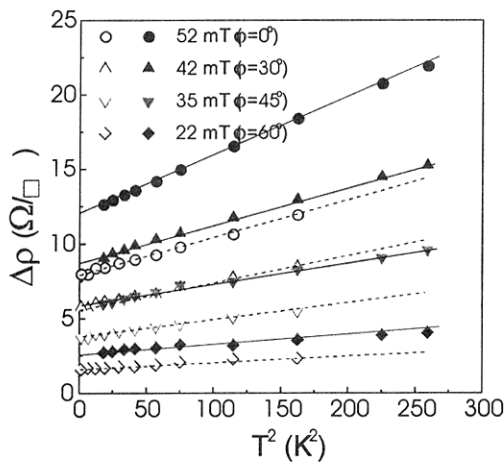
微小超伝導体に磁場をかけたときの磁束系の状態を単電子トランジスタおよび低温STMを用いて調べた。外部磁場の上げ下げに伴う磁束量子1本1本の出入りを単電子トランジスタを用いて検出し、超伝導体が単連結の場合と孔を持つ場合のふるまいの違いを捕らえた。超伝導微小円板の磁束状態を低温STMにより調べ、アプリコソフ格子状態から多数の磁束量子を抱える巨大渦糸状態への相転移を捉えた。

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成し、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。この系のリトル・パークス振動が一様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・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。

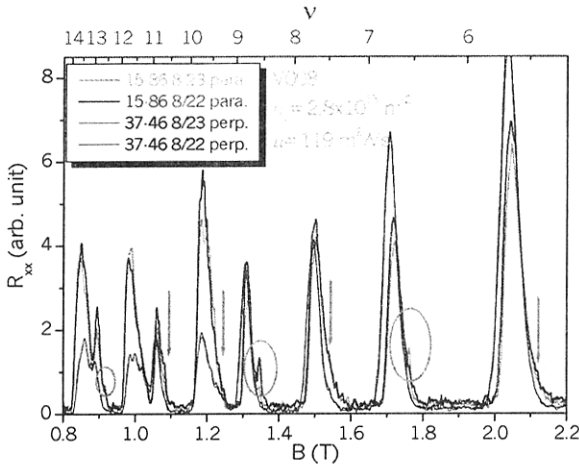
3. 主要成果の図表による説明



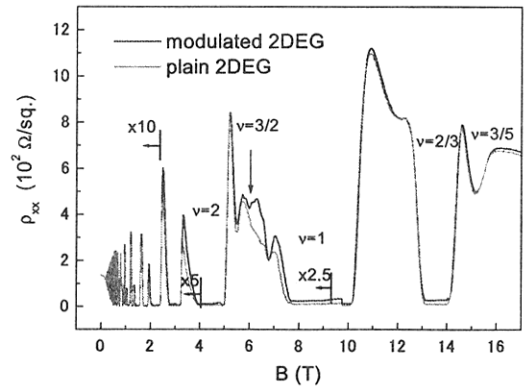
GaAs/AlGaAs ヘテロ構造に強磁性体アレイを配した構造. 2次元電子系に空間変調磁場を印加することができる.



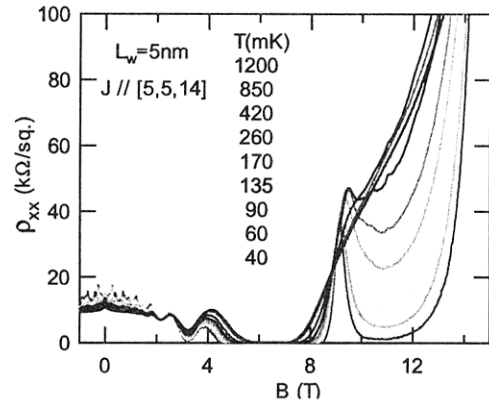
空間変調磁場による余剰抵抗は電子電子散乱の効果を反映する.



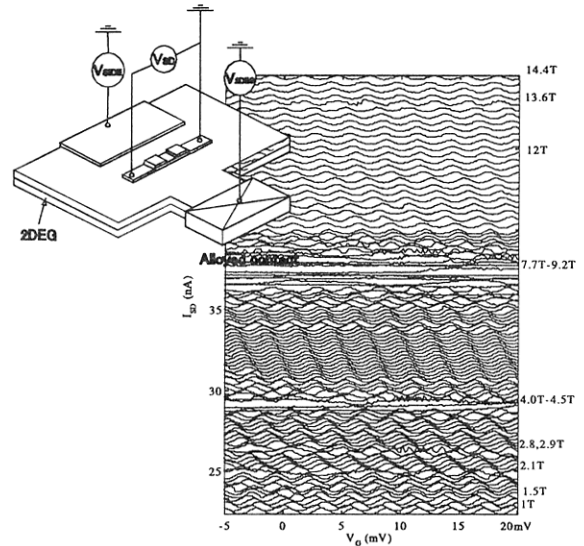
短周期変調を付加した2次元電子系の高次ランダウ準位半占有状態ではストライプ相が安定化される.



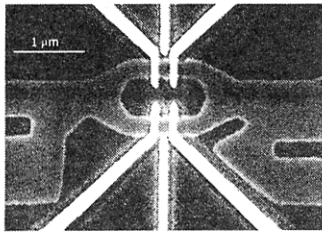
短周期ポテンシャル変調を印加した2次元電子系の量子ホール効果. $\nu=3/2$ 付近で複合フェルミオンの磁気抵抗の整合振動が観測され, スピン偏極の情報を与える.



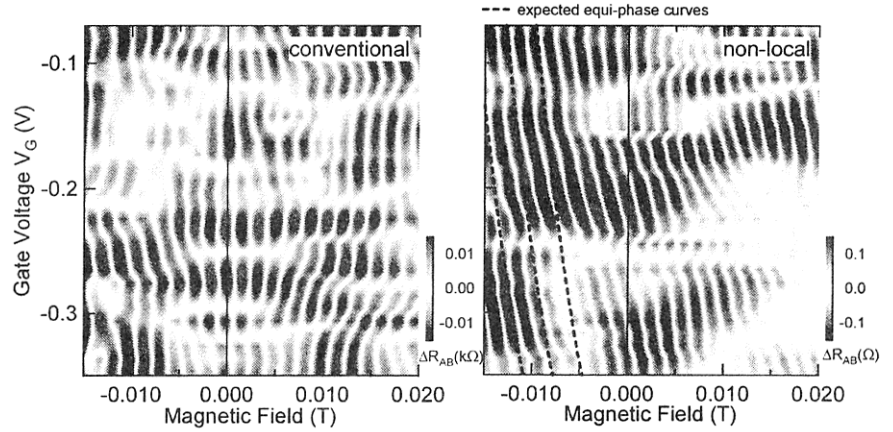
超短周期変調をもつ量子井戸では奇数占有率の量子ホール状態(スピングャップ)が抑制される.



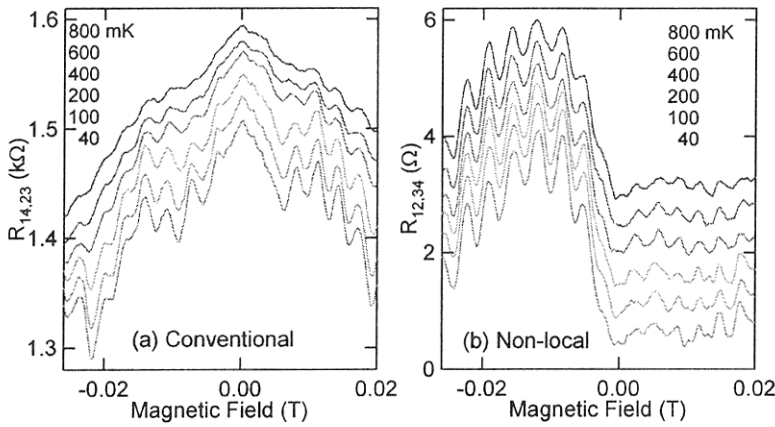
単電子トランジスタを局所化学ポテンシャルプローブとして量子ホール効果のエッジ状態を検出する.



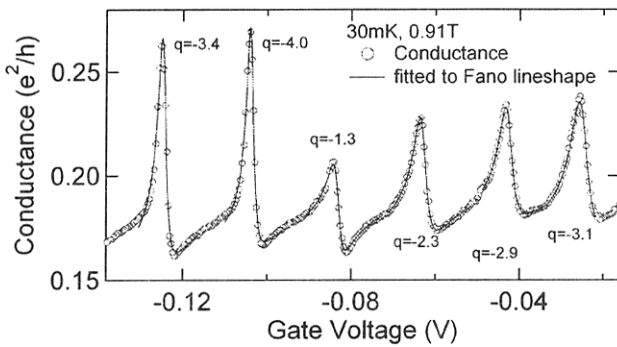
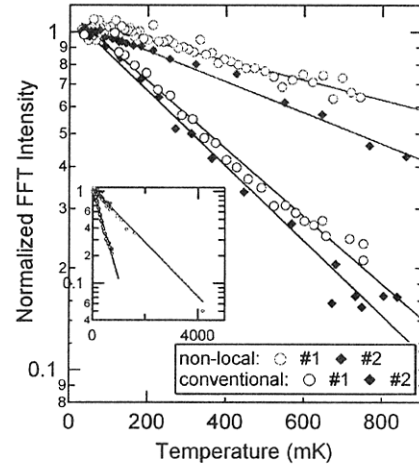
アームに量子ドットをもつアハラノフ・ボーム(AB)リング



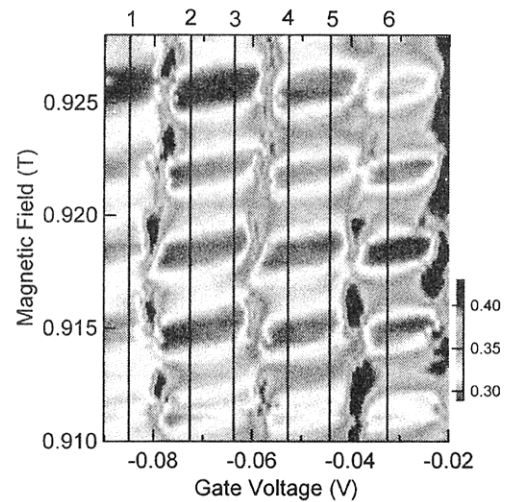
ゲート電圧を変えた時の AB 振動の位相変化. 通常の電極配置 (左図) では位相ロックされるのに対して, 非局所伝導の配置 (右図) では連続的に位相が変化する.

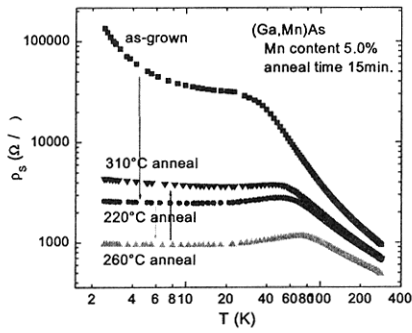


通常電極配置 (上左図) に比べて, 非局所伝導配置 (上右図) では AB 振動の相対振幅が大きく, しかも温度による振幅の減衰が緩やかである (右図).

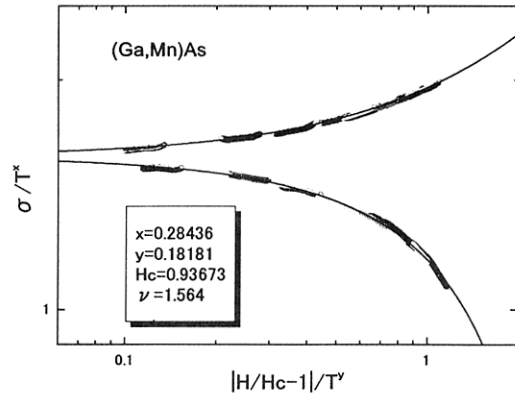


量子ドットの離散準位と反対側のアームの連続準位との共鳴によるファノ干渉を表す非対称クーロン振動波形(上図). 右図はファノ効果を示す領域での AB 振動.

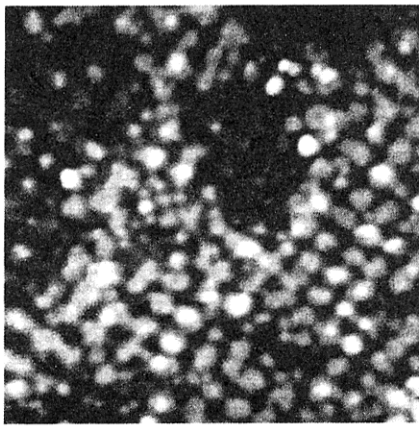




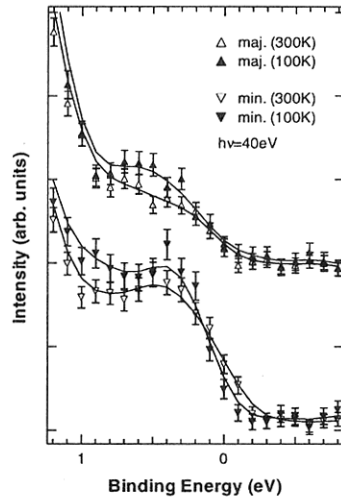
希薄磁性半導体(Ga,Mn)As の低温熱処理効果による膜質の改善と強磁性転移温度および伝導度の向上



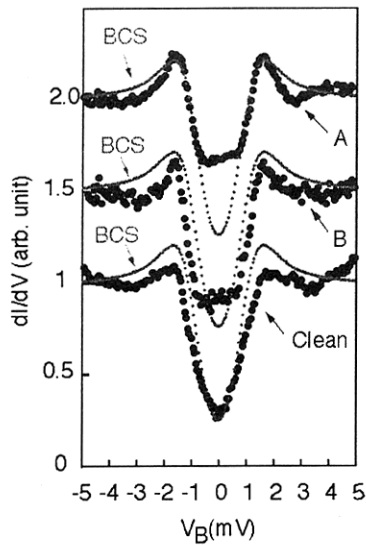
(Ga,Mn)As の磁場誘起金属非金属転移の有限温度2パラメータスケーリングによる解析



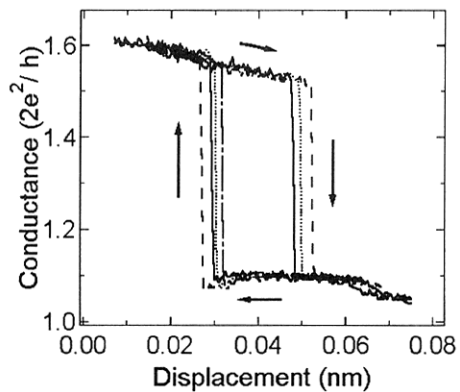
窒素吸着銅(001)面上に形成されたコバルト量子ドットの2次元正方配列のSTM像。各ドットの高さは2原子層で、間隔が7nmである。



マグネタイト単結晶薄膜のスピ分解光電子分光スペクトルを室温とフェルヴェイ転移以下の100Kにおいて測定した結果。



NbSe₂へき開表面の4.2Kでのトンネルスペクトル。Aは鉄微粒子から0.3nm離れた場所、Bは1.2nm離れた場所で測定したもの。比較のため清浄なへき開面でのスペクトルも示した。



Fe ナノワイヤーの電気伝導度とSTM探針移動距離の関係。電気伝導度の跳びにヒステリシスが観測される。

4. 主要論文リスト

- [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: Ferromagnetic 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, 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.
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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
- [9] 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.
- [10] F.Komori and K.Nakatsuji: Quantized Conductance through Atomic-Sized Iron Contacts at 4.2 K
J. Phys. Soc. Jpn. 68 (1999) 3786.
- [11] 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.
- [12] A.Endo and Y.Iye: Novel Structures near $\nu=9/2$ in Short Period Lateral Superlattices
Solid State Commun.117 (2001) 249-254.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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(2x2)N Surface,
Phys. Rev. B63 (2001) 214420(8).
- [16] 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.

5. 外部発表件数

論文	59件
解説記事等	8件

口頭発表	
国内発表	77件
国際会議発表	62件

特許出願	1件
------	----