

平成 21 年 6 月 4 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360018

研究課題名(和文)ツイン・マイクロ4端子プローブによる表面ナノ構造体の磁気輸送現象研究

研究課題名(英文)Study of magnetic transport phenomena of surface nanostructures by twin micro four point probe method

研究代表者

松田 巖 (MATSUDA IWAO)

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号：00343103

研究成果の概要：

本研究では独立駆動型のマルチプローブによる表面磁気抵抗測定装置を世界に先駆けて開発した。本システムを用いれば (i)超高真空 ($10^{-11}\sim 10^{-10}$ Torr) (ii)強磁場(7 T)、(iii)低温 (<10K)の実験条件下での磁気抵抗測定が可能であり、また設置されたツイン・プローブステージでは測定対象に応じて、STM 探針、マイクロ4端子プローブ、マルチ配置用マクロプローブを超高真空下で交換できるようになっている。

固体表面上のナノ金属薄膜の表面磁気抵抗測定に成功し、ナノスケールから原子レベルでの磁気輸送研究への新しい実験方法が確立した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	12,700,000	3,810,000	16,510,000
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	15,700,000	4,710,000	20,410,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：表面、薄膜、ナノ、磁気伝導、磁気抵抗、電気伝導、プローブ、STM、

1. 研究開始当初の背景

固体表面上に形成される単原子層や数 nm

厚の超薄膜での電子の輸送現象はナノデバイス技術開発だけでなく、低次元物理の研究

対象としても大変興味深い。しかしながらこのような微小材料について、通常の金属プローブで電気伝導測定（4端子法）を行った場合、プローブ電流は下地基板に流れ対象物の電位差すなわち電気抵抗を測ることができない。そこで我々はプローブ間隔を十分に狭めることでプローブ電流を表面近傍に抑えた新しい表面電気伝導測定法（マイクロ4端子法）を考案した。そのためにリソグラフィ技術でプローブ間隔を $10\mu\text{m}$ 以下に微細加工したマイクロ4端子プローブや、プローブ間隔を自在に変えることのできる独立駆動型4探針STM装置の開発を行った。そしてSi半導体表面上に作製した様々な金属表面単原子層や超薄膜について、その表面電気伝導測定にこれまで成功してきた。その結果このマイクロ4端子プローブ技術を用いることで、固体表面上のこれらナノ構造体に対する磁気輸送現象研究への展開が拓けた。

2. 研究の目的

物質中の電子は、電子輸送中に磁場を印加するとホール効果などの特有の磁気現象を引き起こす。そして強磁場、低温の条件下ではさらに量子ホール効果、Shubnikov-de Haas 振動、局在・反局在効果などの様々な量子輸送現象が発生する。しかしながらこのような物理現象の研究を、固体表面上のナノ構造体のようなナノスケール～原子レベルの大きさのもので行ったものはなかった。

そこで、本研究ではこれまで我々が培ってきたマイクロプローブによる表面電気伝導の測定技術を元に、世界で初めて独立駆動型マルチプローブによる表面磁気抵抗測定装置を開発し、固体表面上にナノ構造体（金属量子薄膜など）の磁気輸送現象を調べる。

3. 研究の方法

(1) 表面磁気抵抗測定装置の開発

表面系の電子輸送現象の測定にはミクロなプローブが必要であり、ホール抵抗などの磁気抵抗測定ではさらに様々なプローブ配置が求められる。そこで独立駆動型のツイン・プローブステージの設計を行い、多様な実験に応じてプローブをSTM探針やマイクロ4端子プローブなどと交換できるものを考案した。

一方固体表面上でナノ構造は超高真空下で作製され、さらに同条件下でなければ存在もできない。また磁気伝導における量子効果を観測するためには強磁場と低温も必要である。そこで本装置の設計にあたり、上記独立駆動型のマルチプローブシステムが、(i)超高真空 (10^{-10}Torr)、(ii)強磁場(7T)、(iii)低温 ($<10\text{K}$) という条件下で動作できるようにした。

(2) 表面ナノ構造の磁気抵抗測定

本研究では半導体表面上の金属ナノ薄膜の磁気輸送現象を研究対象とした。得られた表面磁気伝導の結果を正しく理解するためには電子状態なども知る必要があるため、各試料の光電子分光によるバンド及びフェルミ面マッピングなどの測定も行った。また、本装置での磁気伝導測定が予定されている様々な試料表面についても、マイクロ4端子法による電気伝導測定を本研究期間中に行った(発表論文参照)。

4. 研究成果

(1) 表面磁気抵抗測定装置の開発

図1に完成した独立駆動型のツイン・プローブステージユニットを示す。各プローブステージには、STM探針、マイクロ4端子プローブ、そして本研究で開発したマルチ配置用マクロプローブが超高真空を保ったまま交換できるようになっている。また図中央にある試料ホルダーも、超高真空下で交換ができる。

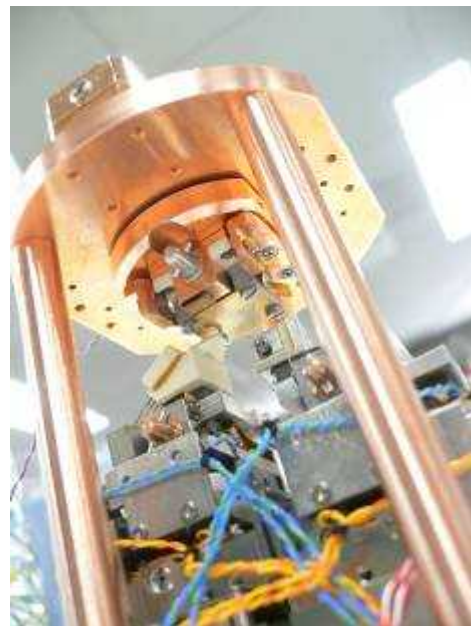


図1 独立駆動型のツイン・プローブステージの写真。右のステージにはSTM探針、左のステージにはマイクロ4端子プローブが設置されている。また中央に試料ホルダーが置かれている。各パーツの素材は低温及び強磁場でも動作が可能なものを選択してある。

図2は本装置の全体像である。磁場印加には超伝導コイルを採用し、本コイルとマルチプローブシステムの冷却用ヘリウムタンクが一体化した超高真空槽(図2左)を製作した。本装置は(i) $10^{-11} \sim 10^{-10}\text{Torr}$ の超高真空、(ii)7Tの強磁場、(iii)7.6K試料及びプローブステージ温度を達成し、設計通りの仕様

得られた。磁気抵抗測定槽は、試料準備槽(図2右)と超高真空を保ったまま接続されており、試料作成後に *in situ* で試料移動及び測定を行うことができる。

本装置完成後は、ツイン・プローブステージのそれぞれに STM 探針を取り付けた 2 端子法と、一方にマイクロ 4 端子を付けた 4 端子法で電気伝導測定の動作を確認した。



図 2 表面磁気抵抗測定装置の写真。左が試料準備槽で右が磁気抵抗測定槽。

(2) 表面ナノ構造の磁気抵抗測定

本研究では表面ナノ構造体である金属超薄膜の磁場抵抗測定を行い、その伝導特性を調べた。超高真空下では Si 基板上に厚さ 1~10nm の金属量子薄膜を原子レベルの平坦性で作製することができる。そこでこれらのナノ金属薄膜について、*in situ* 磁気抵抗測定をプローブ間隔が数 10 μ m のマイクロ 4 端子プローブを用いて行った。

Bi 超薄膜の場合この膜厚領域では磁気抵抗の厚さ依存性はほとんどなかった。また電気伝導測定の結果からこの電子輸送現象における表面層の寄与が大きいことが明らかになった。そこで光電子分光法によりその電子構造を調べたところ、Bi 超薄膜の内部は半金属的であるのに対して表面は金属的であることが分かった。このことから金属超薄膜では高い表面/バルク比から表面に関連した新しい伝導特性が期待された。

そこで厚さ数 nm の Ag 超薄膜についてその表面に Bi を蒸着した 2 次元相を作製し、その磁気抵抗の変化を調べた。この表面秩序相(3 \times 3 相)は大きなスピン-軌道相互作用と表面 2 次元性から Rashba 効果が発現し、表面状態はスピン分裂している。そして磁気抵抗測定の結果、Ag(111)超薄膜に対してこの 3 \times 3 相で覆われた Ag(111)超薄膜では非常に強い反局在効果が確認された(図

3)。そしてこの Bi/Ag(111)超薄膜の量子磁気伝導現象の起源を調べるために高分解能光電子バンドマッピングを行った。その結果、この系の電子構造はスピン分裂した表面状態が超薄膜内の電子状態(量子井戸状態)と複雑に混成しており、スピンに依存したエネルギーギャップが多数形成していることが分かった。現在この Bi/Ag(111)超薄膜のスピン及び電子構造と磁気輸送現象との関係について解析を行っている。

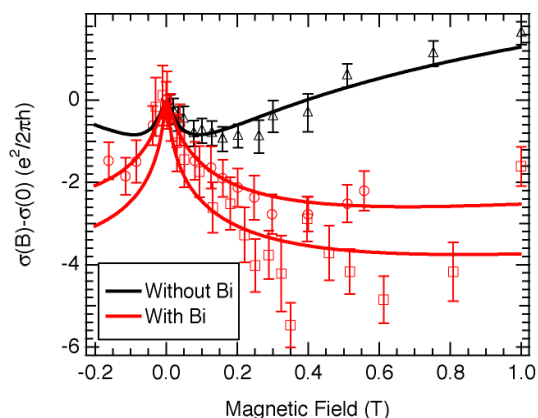


図 3 Ag(111)結晶超薄膜(3nm 厚)の磁気伝導測定の結果。黒い点は Ag ナノ薄膜の結果で、赤い点は 3 \times 3-Bi/Ag 表面相で覆われた Ag ナノ薄膜の結果。各曲線は磁気輸送モデルによるフィッティング。

以上のように本研究は予定通り独立駆動型のマルチプローブによる表面磁気抵抗測定装置を開発し、さらに数 nm 厚の金属超薄膜の新しい量子物性を明らかにした。超高真空下の表面及び超薄膜の磁気伝導はこれまで未開拓だったので、今後も本実験技術により更なる成果が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 13 件)

- (1) M. D'angelo, K. Takase, N. Miyata, T. Hirahara, S. Hasegawa, A. Nishide, M. O gawa, and I. Matsuda, "Conductivity of the Si(111)7 \times 7 dangling-bond state", Phys. Rev. B **79**, 035318 (2009). (査読有)
- (2) K. He, T. Hirahara, T. Okuda, S. Hasegawa, A. Kakizaki, and I. Matsuda, "Spin-p

- olarization of quantum well states in Ag films induced by Rashba effect at surface”, Phys. Rev. Lett. **101**, 107604 (2008). (査読有)
- (3) N. Miyata, K. Horikoshi, T. Hirahara, S. Hasegawa, C. M. Wei, and I. Matsuda, “Electron Transport Property of Quantum-Well States in Ultrathin Pb (111) Films”, Phys. Rev. B **78**, 254405 (2008). (査読有)
- (4) C. Liu, I. Matsuda, S. Yoshimoto, T. Kanagawa, and S. Hasegawa, “Electronic Transport of Au-Adsorbed Si(111)- $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ -Ag Surface: Metallic Conduction and Localization”, Phys. Rev. B **78**, 035326 (2008). (査読有)
- (5) T. Hirahara, T. Komorida, A. Sato, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, K. He, I. Matsuda, and S. Hasegawa, “Manipulating quantum-well states by surface alloying: Pb on ultrathin Ag films”, Phys. Rev. B **78**, 035408 (2008). (査読有)
- (6) I. Matsuda, C. Liu, T. Hirahara, M. Ueno, T. Tanikawa, T. Kanagawa, R. Hobara, S. Yamazaki, S. Hasegawa, and K. Kobayashi, “Electron-phonon interaction and localization of surface-state carriers in a metallic monolayer”, Phys. Rev. Lett. **99**, 146805 (2007). (査読有)
- (7) I. Matsuda and S. Hasegawa, “(Topical Review Paper) Fermiology and transport in metallic monatomic layers on semiconductor surfaces”, J. Phys. Cond. Mat. **19**, 355007 (2007). (査読有)
- (8) T. Hirahara, I. Matsuda, S. Yamazaki, N. Miyata, T. Nagao, and S. Hasegawa, “Large surface-state conductivity in ultrathin Bi films”, Appl. Phys. Lett. **91**, 202106 (2007). (査読有)
- (9) H. Okino, I. Matsuda, S. Yamazaki, R. Hobara, and S. Hasegawa, “Transport in Defective Quasi-One-Dimensional Atomic-Chain Arrays of Gold on Vicinal Silicon Surfaces”, Phys. Rev. B **76**, 035424 (2007). (査読有)
- (10) H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, S. Hasegawa, Y. Kim and G. Lee, “Influence of Defects on Transport in Quasi-One-Dimensional Metallic Atomic-Chain Arrays on Silicon Surfaces”, Phys. Rev. B **76**, 195418 (2007). (査読有)
- (11) T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, and S. Hasegawa, “Quantum Well States in Ultrathin Bi Films Studied by Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy and First Principles Calculation”, Phys. Rev. B **75**, 035422 (2007). (査読有)
- (12) T. Hirahara, I. Matsuda, R. Hobara, S. Yoshimoto, and S. Hasegawa, “Direct measurement of the Hall resistance of a free-electron-like surface state”, Phys. Rev. B **73**, 235332 (2006). (査読有)
- (13) T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, Yu. M. Koroteev, P. M. Echenique, M. Saito, and S. Hasegawa, “Role of Spin-Orbit Coupling and Hybridization Effects in the Electronic Structure of Ultrathin Bi Films”, Phys. Rev. Lett. **97**, 146803 (2006). (査読有)
- [学会発表](計 14 件)
- (1) 武市泰男, 何珂, 奥田太一, 原沢あゆみ, 柿崎明人, 松田巖, “スピン・角度分解光電子分光による (3×3)BiAg/Ag 量子薄膜の研究” 日本物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 30 日、立教大学
- (2) 松田巖、奥田太一、He Ke、小河愛実、武市泰男、柿崎明人, “界面単原子層制御によるナノ薄膜内電子系のトポロジカル相転移”、第 28 回日本表面科学会講演大会、2008 年 11 月 13 -15 日、早稲田大学
- (3) 武市泰男、何珂、奥田太一、原沢あゆみ、柿崎明人、松田巖, “Rashba 効果により Ag 薄膜に誘起されたスピン偏極した量子井戸状態 - スピン・角度分解光電子分光 - ”、第 28 回日本表面科学会講演大会、2008 年 11 月 13 -15 日、早稲田大学
- (4) 宮田伸弘, 魏金明, 平原徹, 長谷川修司, 松田巖, “Pb超薄膜電気伝導度の bilayer 振動 - バンド構造からの考察 - ”, 日本物理学会秋季大会, 2008年9月22日, 岩手大学
- (5) He Ke, H. Narita, T. Okuda, A. Kakizaki, I. Matsuda, “Angle-resolved photoemission spectroscopy study on Rashba spin-split surface state with polarized lights”、日本物理学会秋季大会, 2008年9月22日, 岩手大学
- (6) 松田巖, “Spin-split bands of Ag

- quantum film induced by Rashba effect at a surface”、分子科学研究所セミナー、2008年4月16日、分子研（岡崎）
- (7) 何珂，平原徹，奥田太一，長谷川修司，柿崎明人，松田巖、”Dependence of the hybridization gaps of Bi/Ag - 3× 3 grown on Ag (111) quantum well films on the film thickness and quantum number”、日本物理学会第63回年次大会、2008年3月24日、近畿大学
- (8) 松田巖、”表面・界面超構造を用いた金属超薄膜のフェルミ面、スピン物性の制御”、表面科学会中部支部研究会、2007年1月30日、静岡大学
- (9) 宮田伸弘、成田尚司、平原徹、長谷川修司、松田巖、”超高真空・極低温・強磁場印加型独立駆動マルチプローブシステムの開発”、物性研究所短期研究会、2007年11月21日、東京大学物性研究所
- (10) 松田巖、He Ke、成田尚司、柿崎明人、奥田太一、”半導体表面上金属量子薄膜の新奇物性”、表面科学会、2007年11月1日、東京大学
- (11) 宮田伸弘，成田尚司，平原徹，長谷川修司，松田巖、”極低温・強磁場印加型独立駆動マルチプローブシステムの開発”、日本物理学会第62回年次大会、2007年9月22日、北海道大学
- (12) 松田巖、”表面超構造のフェルミ面、電子輸送現象、そして量子薄膜の電子物性制御”、日本物理学会第62回年次大会、2007年9月22日、北海道大学
- (13) Iwao Matsuda and Shuji Hasegawa, “Fermi surface topology and spin characters of metallic quantum films on semiconductor substrates”, The 10th Asia Pacific Physics Conference

- (APPC10)、2007年8月23日、韓国
- (14) Iwao Matsuda、”Fermi surface topology and spin characters of metallic quantum films on semiconductor substrates”, 日本学術振興会プログラム日仏セミナー、2007年5月23日、フランス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松田 巖 (MATSUDA IWAO)
 東京大学・物性研究所・准教授
 研究者番号：00343103

(2) 研究分担者

長谷川 修司 (HASEGAWA SHUJI)
 東京大学・大学院理学系研究科・准教授
 研究者番号：00228446

(3) 連携研究者