

機関番号：14301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009~2011

課題番号：21760027

研究課題名 (和文) スピン分裂した電子状態をもつ表面ナノ構造の磁気抵抗効果

研究課題名 (英文) Magnetic resistance effect of surface nano-structures with spin-split electronic states

研究代表者

八田 振一郎 (HATTA SHINICHIRO)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：70420396

研究成果の概要 (和文)：

表面ナノ構造の磁気抵抗効果の測定のため、超高真空 (UHV) 槽内で操作可能な4端子抵抗測定器と電磁石コイルを製作した。Ni箔を用いた測定から、この4端子抵抗測定器が金属試料について約 $0.1 \mu\Omega$ の精度で測定できることを確認した。この他、角度分解光電子分光法 (ARPES) やスピン分解 ARPES を用いて Bi や Pb の吸着により Ge(111) 表面に誘起される超構造の電子状態の研究を行った。その結果、これらの構造の表面状態バンドまたは表面共鳴バンドが 200 meV 以上スピン分裂していることを示した。

研究成果の概要 (英文)：

For the purpose of measuring magnetic resistance effect of surface nano-structures, a 4-point probe resistance measurement system and an electromagnet coil have been developed in an ultra-high vacuum (UHV) chamber. On the basis of the measurement on a polycrystalline Ni foil, the accuracy of the resistance measurement was evaluated to be $\sim 0.1 \mu\Omega$. Besides, the electronic structures of the surface superstructures on Ge(111) induced by adsorption of Bi and Pb were studied by angle-resolved photoelectron spectroscopy (ARPES) and spin-resolved ARPES. Large spin splittings exceeding 200 meV were found for surface-state or surface-resonance bands.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：表面物性科学

科研費の分科・細目：応用物理・基礎工学・薄膜・表面物性

キーワード：表面

1. 研究開始当初の背景

近年、結晶表面の超構造や超薄膜の表面などに局在した二次元電子状態についてスピン軌道相互作用によるスピン分裂が観測され、その大きさが半導体量子井戸状態などで

知られている同様の現象に比べて一桁以上大きいことが知られるようになった。これらの表面電子状態のバンド構造など基礎物性に関する研究が多くある一方で、その特異な電子状態を介した伝導現象、特に磁場との相

相互作用に関する研究はほとんど報告されていない。

2. 研究の目的

巨大磁気抵抗効果 (GMR) の成功に見られるように、磁気抵抗効果は応用面でも関心の高い現象である。磁気抵抗効果には電子の軌道が磁場により曲げられることによるものと GMR で見られるような物質のスピンの構造によるものが考えられる。大きなスピン分裂をもつ表面ナノ構造においては空間的な制限と特異なスピン構造を反映した磁気抵抗効果が現れる可能性がある。本研究では、電気伝導性が低い Si や Ge など半導体基板上に作製した表面ナノ構造の電気抵抗 (伝導度) 測定が行える 4 端子測定器と磁場を印加するシステムを構築し、磁気抵抗効果の測定を行う。また、試料となる表面ナノ構造の電子構造の研究を角度分解光電子分光などにより行う。

3. 研究の方法

表面ナノ構造に適用する 4 端子測定器には、試料を超高真空中 (UHV) で作製した後に端子を接触させなければならないという制約がある。さらに、試料との接触圧の調整および端子表面の清浄化、また試料との温度差の低減等についても考慮する必要がある。これらの条件を満たし、なおかつ既存の UHV 槽内において通常の表面科学の実験 (低速電子回折や光電子分光) が行える小型の 4 端子システムを設計、製作する。また、磁場印加に用いる電磁石も UHV 槽内に製作する。

表面ナノ構造の電子状態およびスピンの研究は実験室系での角度分解光電子分光

(ARPES) 実験および Photon Factory におけるスピン ARPES 実験により行う。必要に応じて第一原理バンド計算も行う。

4. 研究成果

UHV 対応 5 端子測定器 (対称実験などに用いるため、4+1 端子で構成した) を製作した (図 1)。5 端子には $\phi 0.1$ の W 線を使用し、互いに約 0.7 mm の間隔で配置した。5 端子を載せた台はウォブルスティックを用いて回転させることができる。これにより試料作成時には 5 端子を試料から約 10 cm 離すことができ、蒸着試料やスパッタリングにより汚染されることはない。またその位置において 5 端子に電子衝撃加熱とスパッタリングを行い、不純物や酸化物などを除去するとともに、接触面を平坦化し、電気的な接触を安定させることができた。この 5 端子測定器付き試料ホルダーは $\phi 45 \times 100$ の円筒に入るサイズであり、これ全体を電磁石の中空に挿入し、測定を行う。また試料ホルダー上部には液体窒素および液体ヘリウムが使用できるタンクがあり、試料および 5 端子を冷却することが

できる。

電磁石は水平方向に 66 Oe/A の磁場が得られる空芯コイルとして作製した。このコイルは CF203 フランジより UHV 槽に設置可能なサイズである。5 端子の間隔は約 0.7 mm である

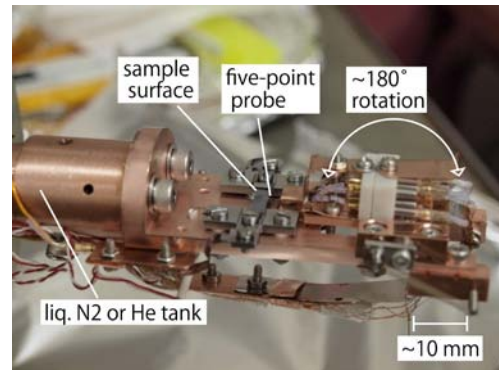


図 1. 製作した 5 端子からなる抵抗測定器 (試料表面へ接触している配置)。

ので、それらが十分均一な磁場中に配置されるように磁場シミュレーションを行い、設計した。またコイルのボビンを液体窒素により冷却できるようにした。この冷却機構は通電時の熱を吸収してデガスが抑え、さらに試料および 5 端子測定器との間の温度差を低減する。また、より強い磁場が必要となすのため、純鉄で製作したリターンヨークも製作した。しかしながら、実用上の観点からは数百 Oe の領域での磁気抵抗効果が重要となることと、磁場の再現性を重視して空芯コイルでの実験を優先した。

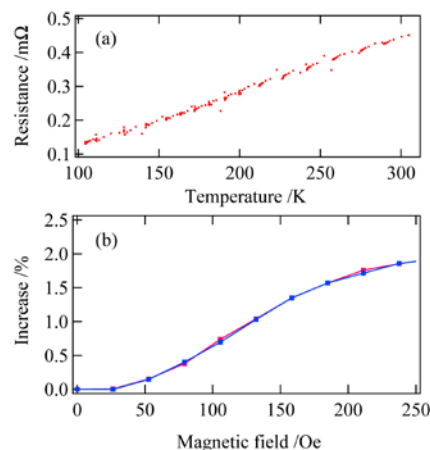


図 2. Ni 箔の抵抗の(a)温度依存性および(b)磁場依存性。

図 2 に Ni 多結晶箔 (厚さ $100 \mu\text{m}$) の試料で製作した 4 端子測定器のデータを示す。抵抗の温度依存性の測定では寒剤 (このデータで

は液体窒素を使用)の追加直後にノイズが入った点が見られるが、概ね安定して300-100 Kの間の抵抗値が得られた。4端子と平行に磁場をかけた抵抗の磁場依存性の測定では、250 Oeまでに2%の抵抗増加が観測された。2本のデータはそれぞれ磁場の向きを反転して測定した結果であるが、良好な再現性が確認された。このような実験から、製作した5端子測定器が安定したオーミックな接合が形成される場合には1mΩ程度の抵抗の0.1%の変化を観測できる精度を持つことが確認された。

表面ナノ構造の電子状態に関する成果としてはBiおよびPbという重元素吸着Ge(111)表面の超構造の構造解析および電子状態の測定を行った。Bi/Ge(111)表面に形成される($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)超構造はBiの単原子層であり、Biがトライマーを構成した原子構造であることを明らかにした。電子状態の測定ではM点近傍のバンド構造をARPESにより詳細に測定し、スピン軌道相互作用を取り入れたバンド計算の結果と合わせて、250 meVにもなるスピン分裂が存在することを示した。Pbの単原子層についても同程度のスピン分裂が見つかり、さらにその電子状態が金属的であることが分かった。この表面のシート伝導度は約3 mSと4端子測定から見積もられた。Si(111)清浄表面の測定結果が約0.3 mSであることなどと比較して、金属的な表面状態の寄与を反映した伝導度が得られたと考えられる。これらの表面超構造の磁気抵抗効果について現在実験を実施している。

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6件)

[1] Y. Ohtsubo, S. Hatta, K. Yaji, H. Okuyama, K. Miyamoto, T. Okuda, A. Kimura, H. Namatame, M. Taniguchi, and T. Aruga, Spin-polarized semiconductor surface states localized in subsurface layers, *Physical Review B*, 査読有, 82 巻, 2010, 201307(R) (4 pp.)

[2] K. Yaji, Y. Ohtsubo, S. Hatta, H. Okuyama, K. Miyamoto, T. Okuda, A. Kimura, H. Namatame, M. Taniguchi and T. Aruga, Large Rashba spin splitting of a metallic surface-state band on a semiconductor surface, *Nature Communications*, 査読有, 1 巻, 2010, 17 (5 pp.)

[3] 有賀 哲也, 八田 振一郎, 表面系の Rashba 効果, *J. Vac. Soc. Jpn.*, 査読有, 52 巻, 2009, 577-581.

[4] Y. Ohtsubo, S. Hatta, M. Iwata, K. Yaji, H. Okuyama and T. Aruga, Structure determination of Bi/Ge(111)-($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)R30° by dynamical low-energy electron diffraction analysis and scanning tunneling microscopy, *J. Phys.: Condens. Matter*, 査読有, 21 巻, 2009, 405001 (6 pp.)

[5] S. Hatta, Y. Ohtsubo, S. Miyamoto, H. Okuyama and T. Aruga, Epitaxial growth of Bi films on Ge(111), *Applied Surface Science*, 査読有, 256 巻, 2009, 1252-1256.

[6] S. Hatta, T. Aruga, Y. Ohtsubo and H. Okuyama, Large Rashba spin splitting of surface resonance bands on semiconductor surface, *Physical Review B*, 査読有, 80 巻, 2009, 113309 (4 pp.)

[学会発表] (計15件)

[1] 大坪嘉之, 森亮順, 矢治光一郎, 八田振一郎, 奥山弘, 有賀哲也, Br 終端 Ge(111) 基板の subsurface 領域に局在するスピン偏極電子状態, 日本物理学会 第66回年次大会, 2011.3.26 (新潟)

[2] 岩田学, 八田振一郎, 矢治光一郎, 河合宣彦, 田尻寛男, 坂田修身, 奥山弘, 有賀哲也, PbBi 共吸着 Ge(111) 表面の原子構造 II, 日本物理学会 第66回年次大会, 2011.3.25 (新潟)

[3] 矢治光一郎, 大坪嘉之, 八田振一郎, 武市泰男, 奥山弘, 有賀哲也, PbBi 共吸着 Ge(111) 表面のスピン偏極した金属的ショックレー状態, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010.9.25 (大阪)

[4] 大坪嘉之, 森亮順, 矢治光一郎, 八田振一郎, 奥山弘, 有賀哲也, Br/Ge(111) 表面の Shockley 状態とスピン軌道相互作用, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010.9.24 (大阪)

[5] 岩田学, 八田振一郎, 矢治光一郎, 河合宣彦, 田尻寛男, 坂田修身, 奥山弘, 有賀哲也, PbBi 共吸着 Ge(111) 表面の原子構造, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010.9.24 (大阪)

[6] S. Hatta, S. Miyamoto, Y. Ohtsubo, H. Tajiri, O. Sakata, H. Okuyama, and T. Aruga, First-order transition following precursory relaxation of Peierls distortion on In/Si(111), 18th International Vacuum Congress (IVC-18),

2010. 8. 26 (Beijing, China)

[7] 矢治光一郎, 大坪嘉之, 武藤宏, 八田振一郎, 奥山弘, 有賀哲也, Pb/Ge(111)- β ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)R30° の表面構造と電子状態, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 2010. 3. 21 (岡山)

[8] 大坪嘉之, 矢治光一郎, 八田振一郎, 奥山弘, 宮本幸治, 奥田太一, 木村昭夫, 生天目博文, 谷口雅樹, 有賀哲也, Ge に由来する表面状態の Rashba スピン分裂構造, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 2010. 3. 20 (岡山)

[9] 八田振一郎, 宮本早苗, 大坪嘉之, 田尻寛男, 坂田修身, 奥山弘, 有賀哲也, 表面 X 線回折法による In/Si (111)-(4×1) 表面の相転移の研究 II, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 2010. 3. 20 (岡山)

[10] Y. Ohtsubo, M. Iwata, S. Hatta, H. Okuyama and T. Aruga, Large Rashba spin splitting on Bi/Ge(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$), 11th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICESS-11), 2009. 10. 6 (Nara)

[11] K. Yaji, S. Hatta, H. Okuyama, T. Aruga, Rashba spin splitting of metallic surface state for 4/3-monolayer Pb/Ge(111) , 11th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICESS-11) , 2009. 10. 6 (Nara)

[12] 矢治光一郎, 大坪嘉之, 八田振一郎, 奥山弘, 宮本幸治, 奥田太一, 木村昭夫, 生天目博文, 谷口雅樹, 有賀哲也, 4/3 原子層鉛吸着した Ge(111) 表面のスピン分裂した電子状態, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009. 9. 27 (熊本)

[13] 大坪嘉之, 矢治光一郎, 八田振一郎, 原沢あゆみ, 奥田太一, 松田巖, 奥山弘, 有賀哲也, Bi/Ge(111)-"2×1" 表面の原子構造と電子状態, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009. 9. 26 (熊本)

[14] 八田振一郎, 奥山弘, 有賀哲也, 角度分解光電子分光法による Sb/Ge(111)-(2×1) 表面の電子状態の研究, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009. 9. 26 (熊本)

[15] S. Hatta, Y. Ohtsubo, H. Okuyama and T. Aruga, Giant Rashba spin splitting of surface-resonance bands on

Bi/Ge(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$) ,
26th European Conference on Surface Science (ECOSS-26), 2009. 9. 3 (Parma, Italy)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八田 振一郎 (HATTA SHINICHIRO)
京都大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号 : 7 0 4 2 0 3 9 6