

## 1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として小森田拓と東野剛之が、10月から特任研究員として保原麗が新しくメンバーに加わった。9月には顧艶が修士課程を終了し中国に帰国した。3月には、宮田伸弘と高瀬恵子が博士課程を修了し、北岡佑介と新沼優人が修士課程修了し、それぞれ企業に就職した。

当研究室では、表面物性、特に「表面輸送」をキーワードにして実験的研究を行っている。おもにシリコン単結晶表面上に形成される種々の表面超構造や超薄膜を利用し、それらナノスケール低次元系に固有の電子状態や電子輸送特性、スピン状態を明らかにし、3次元結晶の電子状態では見られない新しい現象を見出し、機能特性として利用することをめざしている。そのために、表面構造や原子層成長の制御・解析、表面電子状態、電子輸送特性、スピン状態、電子励起など、多角的に研究を行っている。また、これらの研究のために、新しい手法・装置の開発も並行して行っている。以下に、本年度の具体的な成果を述べる。

### 1.1.1 表面電子輸送

希薄磁性金属表面における電気抵抗異常； 近藤効果とRKKY相互作用の競合

Si(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In表面は、放物線的バンドをもった表面二次元自由電子系として知られており、冷却によって電気抵抗が単調減少する金属的振る舞いを示すことが当研究室によって明らかにされている。この表面に磁性不純物としてCo原子を希薄(0.0013原子層以下)に蒸着し、プローブ間隔が数十 $\mu\text{m}$ のマイクロプローブを用いた表面敏感電気伝導測定法によって電気抵抗の温度依存性を測定した。その結果、温度降下に対して、室温から100 K程度までは $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In表面と抵抗の差異がなく、電気抵抗が減少していく。しかし、それ以下の温度で抵抗が増大し始め、さらに低温領域で抵抗減少に転じた。この抵抗極大の温度はCoの蒸着量に依存することが分かった。このような抵抗異常は、三次元希薄磁性合金においては、スピングラスの特徴であることが知られている。一般的な抵抗増大の原因として、弱局在及び電子相関も挙げられるが、これらでは説明できないことが計算により分かった。そこで近藤効果・RKKY相互作用の競合の理論を適用した結果、今回の観測結果の抵抗極大温度のCo濃度依存性を用いて、近藤温度やスピングラスを特徴づける温度を導出することに成功した。しかし、観測した抵抗異常を定量的に説明できなかった。そこで、 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In表面がdisorderの強い表面であることに注目し、disorderによって近藤効果が増大される理論を適用し、観測した抵抗増大を定量的に説明することができた。これらの議論から、希薄磁性金属表面において、近藤効果とRKKY相互作用の競合が確かに重要であることが分かった。

さらに、Co濃度を10倍以上にすると、温度降下

によって電気抵抗は金属的に減少したのち、極小を示して抵抗増大に転じるだけで抵抗極大が見られなかった。これは、Co蒸着によりさらにdisorderが増えたことに起因すると考えられる。これらの抵抗増大部分は、弱局在や電子相関では説明できず、また、disorderの強い物質で適用できると報告されているトンネル電子モデルでも観測結果は十分に説明できなかった。そこで、磁性不純物濃度が高くdisorderが強いアモルファス物質で観測されるKondo-like抵抗の解析で行われているように、規格化した抵抗の大きさと抵抗極小の温度をCo濃度に対して調べた。その結果、観測結果の振る舞いが、系の磁性状態の変化(スピングラス状態から強磁性秩序の始まりへの変化)を示唆していることが分かった。

トポロジカル絶縁体のバンド構造とエッジ状態の輸送特性

スピン軌道相互作用が強い物質において、バルクはバンドギャップが開き絶縁体であるが、エッジ(表面)に金属的な状態が形成されるトポロジカル絶縁相が発現することがあり、昨今理論的に話題になっている。最近3次元物質のBiSb合金結晶がこのトポロジカル絶縁体になっているという報告があった。そこで本研究ではシリコン表面上にBiSb合金超薄膜を成長させ、その電子状態と表面状態の輸送特性に関して検証を行った。角度分解光電子分光による測定は残念ながら分解能が足りなく、トポロジカル絶縁体の特徴を発見することはできなかった。一方マイクロ4端子法でBiSb合金超薄膜の電気伝導度の膜厚依存性より表面状態の室温における電気伝導度を決定することができた。今後は不純物を入れた場合の電気伝導度の温度依存性に主眼を置いて研究を続ける。

Bi(001) 薄膜の磁気抵抗

Bi(001) 薄膜は巨大磁気抵抗を示すことが報告されている。そこでBi(001) 薄膜を超高真空環境で作成してその磁気抵抗をその場測定した。1 $\mu\text{m}$ の試料で1,000%の磁気抵抗比を得た。この値は先行研究の値よりも小さいが、それは作成条件の違いからBiの電子とホール濃度比が異なるためであると考えられる。また、磁気抵抗比の膜厚依存性から表面状態の寄与分を見積ったところ、およそ10%であった(物性研究所との共同研究)

Bi/Ag(111) 超薄膜の磁気抵抗

固体表面における表面状態がRashba効果によってスピン分裂していることが光電子分光の実験から明らかになってきた。加えて、金属超薄膜内の量子井戸状態もスピン分裂していることがスピン角度分解光電子分光の直接測定から報告されている。一方、磁気抵抗の測定からスピン緩和時間が得られること

が知られている。そこで Ag(111) 超薄膜表面上に Bi を  $1/3$  原子層ほど吸着させた Ag(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Bi 超薄膜の磁気抵抗を測定することで系のスピン緩和時間を求めた。その値は 1 ps 程度であった。さらに系のスピン緩和機構が Rashba 効果によって起こる伝導帯のスピン分裂に起因すると仮定して、系の Rashba 相互作用定数を各々の量子井戸状態に対して求めた。その値は  $1 \times 10^{-12}$  eV m 程度で、現行の角度分解光電子分光では検出できないほど小さな値である。以上の研究によって、マイクロ 4 端子プローブ法による磁気輸送測定装置によって、金属量子薄膜の磁気輸送現象によけるスピン軌道相互作用を調べることが可能となった（物性研究所との共同研究）

#### キャリアドーブしたモット絶縁体表面の電気伝導度

Si(111) 表面上に Sn を  $1/3$  原子層 (ML) 蒸着すると  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  構造が形成される。最近この表面は Mott 絶縁体であることが知られており、キャリアドーブすることによって金属的ふるまいに変わることが期待される。今回プローブ間隔  $20 \mu\text{m}$  のマイクロ 4 端子プローブ法を用いて、微量の Na や In 原子吸着によってキャリアドーブした表面の電気伝導度測定を行った。室温から 260 K においては、温度が下がるにつれて抵抗も下がり、金属的ふるまいに変わった。一方 260 K においては温度が下がると抵抗が急激に増大した。これはキャリアドーブした原子が散乱体として寄与してキャリアの局在が起こったと考えられる。今後はこれらの表面の角度分解光電子分光による電子状態の測定や走査トンネル顕微鏡による原子構造観察を行う予定である。また、この  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Sn 表面上に Na を約  $1/9$  ML 蒸着すると、 $3 \times 3$  構造に変化することが RHEED 観察から発見されている。今回走査トンネル顕微鏡 (STM) によってこの表面を観察し、サンプルバイアスが正においての像をとり、 $3 \times 3$  の構造を確認することができた。今後、この構造の電子状態および伝導特性も合わせて測定する予定である。

#### ダマシン Cu ワイヤの電気伝導

半導体デバイスに使われる Cu 配線の線幅の減少に伴って抵抗率が上昇する原因としては表面散乱や粒界散乱が考えられている。しかし、これらの影響を微小領域電気伝導測定で直接観測したという報告はない。そこで、白金被覆カーボンナノチューブ (CNT) 探針を電気伝導測定プローブとして用いた 4 探針 STM 装置によって、ダマシン法で作成された様々な線幅の Cu 配線について 4 端子電気伝導測定を室温で行った。CNT の探針間隔を最短で 70 nm まで小さくして測定する事に成功した。測定した全ての線幅のワイヤにおいて、電気抵抗は 70 nm の探針間隔まで探針間隔に比例しており、古典的な 1 次元拡散伝導の振る舞いを示した。また線幅の減少に伴い抵抗率が上昇することが確認された。さらに測定した一番細い幅 70 nm のワイヤに関して 200nm 以下の

探針間隔で粒界散乱の影響を直接観測することに成功した。（東京大学工学部との共同研究）

#### Fe シリサイドナノワイヤの電気伝導

Si(110) 面に Fe を蒸着すると FeSi<sub>2</sub> ナノワイヤが形成され、加熱処理によって金属的な  $\gamma$  相から半導体的な  $\beta$  相に転移することが知られている。 $\gamma$  相と  $\beta$  相のそれぞれについて、金属被覆カーボンナノチューブ探針を用いた 4 探針 STM 装置によって電気伝導測定を室温で行った。その結果、いずれの場合も薄膜で報告されている抵抗率と近い値を得た。また、 $\gamma$  相では探針間隔 40 nm まで抵抗は探針間隔に比例し、古典的な 1 次元拡散伝導を示した。一方、 $\beta$  相においては、探針間隔が狭い部分で離散的な抵抗を示し、古典的な 1 次元拡散伝導から外れる振る舞いが見られた。これは半導体的な  $\beta$  相の伝導電子の平均自由行程が長いため、個々の散乱が見える準弾道伝導現象と考えられる。今後は他の  $\beta$  相のナノワイヤ測定を行い、物理機構を明らかにする予定である。

#### ハイドーブ基板を用いた Si(111)- $4 \times 1$ -In 表面の電気伝導度

Si(111) 表面上に 1 原子層の In を蒸着すると、異方性をもった  $4 \times 1$ -In/Si(111) が形成される。この表面は 130 K 程度で  $8 \times 2$  に絶縁体相に相転移し、抵抗が急激に増大する。最近この表面に O<sub>2</sub> や H<sub>2</sub> を吸着させると、この転移温度が変化することが見出された。また、ハイドーブの Si(111) 基板表面上では転移温度が大きく低下するという STM 観察が報告された。本研究では、ハイドーブ基板にこの表面構造を作製し、室温から 90 K までの電気伝導度測定を行った。その結果、急激に抵抗が増加する転移温度は見られず、RHEED パターンにも変化がなかった。つまり、転移温度は 90 K より低温にあると考えられ、低ドーブ基板と相転移温度が異なることが明らかとなった。今後はこの試料をさらに冷やして電気伝導度測定を行い、その転移温度を明らかにする。（韓国 Inha 大学との共同研究）

### 1.1.2 表面ナノ構造

#### SiC 上のグラフェンの電子状態

シリコンカーバイド (SiC) を真空中で 1250°C に加熱すると Si が脱離して表面上に炭素が堆積することが知られており、単原子層の炭素であるグラフェンが形成される。さらに高温で加熱すると炭素の原子層が増え、最終的にはグラファイトになる。原子層の数が増えるにつれていわゆる Dirac バンドの数が増え、層数を判別できる。本研究ではまずグラフェン作成の条件を最適化するために SiC を様々な温度で加熱後にバンド構造を角度分解光電子分光法によ

て測定した。その結果過去の報告とほぼ同じ分散形状を得ることに成功し、確かに単原子層や数原子層のグラフェンが形成されていることが明らかになった。今後は走査電子顕微鏡 (SEM) でグラフェンの実空間観察を行い、その細かいドメイン構造や層数判別、さらには電気伝導測定を行う予定である。

### シリコン表面上極薄 Ag 超薄膜の量子井戸状態の Rashba 分裂

反転対称性が破れている系ではスピン軌道相互作用により非磁性物質であっても Rashba 効果によってバンドがスピン偏極することが知られている。今までこのような Rashba 分裂した系においては表面状態に関する研究が主であった。今回シリコン表面上に六原子層の銀 (Ag) 超薄膜を作成し、角度分解光電子分光測定を行った。その結果膜内の電子が閉じ込められたことで形成される量子井戸状態においても Rashba 分裂に近い傾向が見られた。今後より低温で高分解能測定およびスピン分解光電子分光測定を行って実際にスピン分裂しているかどうかさらに詳しい検証を行う予定である。

### Si(111)4×1-In 表面の相転移に及ぼす欠陥の影響

Si(111)4×1-In は擬 1 次元金属的な電子物性を持つ表面超構造として知られている。ここでの原子ワイヤ中の欠陥を調べることは、低次元系の物理という観点からもナノデバイス応用の観点からも興味深い。4×1-In 構造が低温で示す 8×2-In 構造への相転移は、基本的には電荷密度波 (CDW) の発生を伴うパイエルス転移と考えられている。反射高速電子線回折 (RHEED) における各構造のスポット強度の温度依存性をとることにより、相転移温度を決定できる。4×1-In 清浄表面に導入した欠陥種 (酸素、水素、インジウム等) と欠陥密度 (吸着量) による相転移温度の変化を系統的に調べた。その結果、RHEED 強度変化では、酸素欠陥の場合と、水素・インジウム欠陥の場合とで欠陥密度と相転移温度の依存性が異なることが発見された。なお、電気伝導測定による金属絶縁体転移としての相転移温度の振る舞いとも異なり、実験手法によって見ている相転移のメカニズムも異なることも発見された。RHEED 強度変化は原子構造変化を反映するものである。4×1-In 構造と 8×2-In 構造、その中間の 4×2-In 構造で、欠陥種と欠陥密度によって CDW の各種ピン止めおよびロッキング (隣接ワイヤ間に効いて 8x の周期を生むもの、欠陥により誘起されて x2 の周期を生むもの等) が効き始める温度が異なることが推測される。今後は STM 観察や CDW の理論と合わせて、複雑な表面系の相転移のメカニズムをさらに明確に検証していく予定である。(韓国 Inha 大学との共同研究)

### SMOKE 装置による Gd/In/Si(111) 表面の磁性

金属に磁性不純物を入れると近藤効果や RKKY 相互作用等の興味深い現象が起きる。これらの現象は物理的な面においてだけでなく、技術への応用面においても重要であり、広く研究されてきた。特に Mn を GaAs に混ぜると“希薄磁性半導体”が形成されることが知られている。系の次元を低下させる事により、遮蔽の効果が弱くなるため、不純物の効果は大きくなると予想される。そこで、本研究では磁性特性を評価するために SMOKE (表面磁気光カー効果) 装置を製作し、1 原子層の In を Si(111) 表面上に蒸着して得られる、自由電子的二次元金属である  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  構造上に Gd を蒸着して、表面磁気カー効果測定、RHEED・STM 観察、マクロ 4 端子電気伝導測定を行った。その結果、 $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In 表面は、Gd の蒸着により  $\sqrt{7} \times \sqrt{7}$  に相転移し、80 K で、磁場を表面垂直方向に印加する極カー効果測定において、磁気ヒステリシスが得られた。また、Gd の蒸着により電気伝導度が増大するのが観測された。これは、Gd が自由電子的なバンドに電子を供給したという事を示していると思われる。

### 1.1.3 新しい装置・手法の開発

#### グリーン関数 STM 装置の改良

当研究室では、約 6 K までの低温で動作可能な独立駆動型 4 探針 STM 装置を開発している。本年度は主に、Si(111)4×1-In 表面とその上に成長させた Ag 薄膜の電気伝導測定に特化してセットアップを進めてきた。いずれの系も擬 1 次元の電子的性質を持つことが知られており、4 端子測定の温度依存性や探針間隔依存性、膜厚依存性を測ることで、フェルミ面のトポロジカル相転移、表面パイエルス転移、バリステック伝導の直接観測、異方性のある系での局在現象等の物理現象の解明に役立つことが期待される。低温での安定した動作と温度依存性測定を可能にするために、装置の冷却機構を大幅に改良し、寒剤 (ヘリウム 4) の持続時間を向上させた。この装置では、STM/STS や温度可変マイクロ 4 端子電気伝導測定に加え、「多探針 STM」の利を活かして、輸送現象の本質的な特性を表す遅延グリーン関数の実空間マッピングや、磁性探針を用いた表面でのスピンホール効果検出などが可能である。来年度は実際に、上記の表面超構造や量子薄膜のほかナノワイヤ等の電気伝導測定を  $\mu\text{m}$  から nm のオーダーの探針間隔で 4 端子測定を行う予定である。

#### 磁気抵抗測定装置の開発

超高真空 ( $\leq 1 \times 10^{-8}$  Pa)、極低温 (液体 He 温度)、強磁場 ( $\sim 7$  T) 環境下で動作するマイクロ 4 端子プローブ法による電気伝導測定装置の開発を行い、実際に 7.6 K, 最大 7 T において表面敏感・微小領域の電気伝導測定が可能となった。プローブを駆動さ

せるピエゾ素子の駆動法の制御法を改良することで、プローブの破壊や測定値のばらつきを防ぐことに成功し、装置の稼働率が大幅の向上した。

今年度の研究は下記の研究費補助のもとで行われた。記して感謝いたします。

- ・日本学術振興会 科研費 基盤研究A「半導体結晶上の希薄磁性表面状態の形成とスピントロニクスへの応用」(代表 長谷川修司)
- ・日本学術振興会 日中韓フォーサイト事業「サブ 10 nm ワイヤ; その新しい物理と化学」(日本側代表 長谷川修司)
- ・科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発事業 プロトタイプ実証・実用化プログラム「マルチプローブ顕微鏡プローバースystem」(代表 長村俊彦)

< 報文 >

(原著論文)

- [1] K. He, T. Hirahara, T. Okuda, S. Hasegawa, A. Kakizaki, and I. Matsuda: *Spin-polarization of quantum well states in Ag films induced by Rashba effect at surface*, Physical Review Letters **101**, 107604 (Sep, 2008).
  - [2] H. Morikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Absence of Charge-Density Waves on the Dense Pb/Ge(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  Surface*, Physical Review B **77**, 193310 (May 2008).
  - [3] 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*, Physical Review B **78**, 035408 (Jul 2008).
  - [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*, Physical Review B **78**, 035326 (Jul, 2008).
  - [5] 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*, Physical Review B **78**, 245405 (Dec, 2008).
  - [6] M. D'angelo, K. Takase, T. Hirahara, S. Hasegawa, and I. Matsuda: *Conductivity of the Si(111)7  $\times$  7 dangling-bond state*, Physical Review B **79**, 035318 (Jan, 2009).
  - [7] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Localization and Hopping Conduction at Glass and Crystal Phases of Monatomic Au Layers on Silicon Surface*, Physical Review B **79**, 085317 (Feb, 2009).
  - [8] T. Hirahara, K. Miyamoto, A. Kimura, Y. Ninuma, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, T. Nagao, I. Matsuda, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, and S. Hasegawa: *Origin of the surface-state band-splitting in ultrathin Bi Films: From a Rashba effect to a parity effect*, New Journal of Physics **10**, 083038 (Aug, 2008).
  - [9] Y. Kakefuda, K. Narita, T. Komeda, S. Yoshimoto, and S. Hasegawa: *Self-assembled Nanowire Arrays of Gold Nanoparticles*, Applied Physics Letters **93**, 163103 (Oct, 2008).
  - [10] C. Liu, I. Matsuda, T. Hirahara, S. Hasegawa, J. Okabayashi, S. Toyoda, and M. Oshima: *Band-bending inhomogeneity of Au adsorbed Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag evaluated with Si 2p core-level spectra*, Surface Science **602**, 3316 (Sep, 2008).
- (総説)
- [11] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Growth, Quantum confinement and Transport mechanisms of Ge nanodot arrays formed on a SiO<sub>2</sub> monolayer* (Review), e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **6**, 191 (Aug, 2008).
  - [12] T. Hirahara: *Electronic structure of ultrathin bismuth films: The Rashba and quantum-size effects and their interplay*, Journal of Vacuum Society of Japan, 印刷中.
- (国内雑誌)
- [13] 長谷川修司: 半導体結晶表面上の擬 1 次元金属, 真空 **51** (No. 7), 453 (Jul, 2008).
  - [14] 保原麗、長谷川修司: 4 探針 STM 装置, 応用物理学会薄膜表面物理分科会 News Letter No. 133, pp. 23 (Sep, 2008).
  - [15] 平原徹、松田巖、山崎詩郎、長谷川修司: ビスマス量子薄膜における表面状態による電気伝導, 表面科学、印刷中.
- (著書)
- [16] 長谷川修司: 見えないものをみる - ナノワールドと量子力学 -, UTフィジックス・シリーズ, 東京大学出版会 (Oct, 2008).
- (その他)
- [17] 長谷川修司: *e-Journal* の現状と将来 - 表面科学講演大会特別講演より -, 表面科学 **29**, 437 (Jul, 2008).
  - [18] 長谷川修司: 国際物理オリンピック 2008 ベトナム大会報告, 応用物理 **77** (No. 11), 1364 (Nov 2008)
  - [19] 長谷川修司: 物理チャレンジ 2008 全国大会実験コンテスト, 大学の物理教育 **14** (No. 3), 139 (Nov, 2008)
  - [20] 長谷川修司: 国際物理オリンピック ~ 世界に羽ばたく物理のハンカチ王子たち ~, 教育フォーラム 中学校数学理科保健体育、2008 秋号 p. 22 (大日本図書, Sep, 2008).
- (学位論文)

- [21] 高瀬恵子: *Interaction between magnetic adatoms and surface two-dimensional electron gas* (博士論文).
- [22] 宮田伸弘: 磁場中マイクロ4端子プローブ法による金属量子薄膜の輸送現象の研究 (博士論文).
- [23] 顧艶: *Electronic Structure and Transport of Sn-terminated Silicon Surface* (修士論文).
- [24] 北岡佑介: カーボンナノチューブ探針を用いたナノワイヤの電気伝導測定 (修士論文).
- [25] 新沼優人: 超高真空低温型表面磁気光学カー効果測定装置の開発とそれによる表面磁性研究 (修士論文).

< 学術講演 >

(国際会議)

招待講演

- [26] T. Hirahara: *The Rashba and quantum size effects in ultrathin Bi films*, Deutsche Physical Gesellschaft Spring Meeting, 2009年3月27日 (Dresden, Germany).
- [27] S. Hasegawa: *The Art and Science of Multi-tip Nanoprobes*, Brookhaven National Laboratory Workshop "Electrical Nanoprobes" (2008 NSLS/CFN User's Meeting), 2008年5月19日 (Brookhaven National Laboratory, USA).
- [28] S. Hasegawa: *Carrier Localization and Transport at Metallic Atomic Wires and Monolayers on Silicon Surfaces*, The 14th International Conference on Solid Films and Surfaces, 2008年7月1日 (Trinity College, Dublin, Ireland).
- [29] S. Hasegawa: *Kondo effect in transport on Co/Si(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In surface*, Korean Vacuum Society (The 6th Korea-Japan Symposium on Surface Nanostructures), 2009年2月11日 (Hyundai Seongwoo Resort, Korea).
- [30] S. Hasegawa: *Electronic Transport on Surfaces and Nanowires Measured by Microscopic Four-Point Probes*, Joint Symposium by Nanyang Technological University and University of Tokyo, 2009年2月20日 (Nanyang Tech. Univ., Singapore).
- [31] S. Hasegawa: *Transport on Surfaces and Nanowires Measured by Microscopic Four-Point Probes*, 2009 WPI-AIMR Annual Workshop, 2009年3月4日 (蔵王, 宮城).

一般講演

- [32] K. Takase, T. Shibusaki, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Kondo effect in transport on Co/Si(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In surface*, Symposium on Surface and Nano Science 2009, 2009年1月28日 (雫石).
- [33] S. Hasegawa: *Electronic Transport on Surfaces and Nanowires Measured by Microscopic Four-Point Probes*, Annual Meeting of A3 Foresight Program Seminar, 2009年2月23日 (Xiamen University, China).

- [34] Y. Gu, T. Hirahara, H. Morikawa, S. Hasegawa: *An insulating ground state of Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Sn revealed by micro-four-pointprobe conductivity measurements*, The 4th Vacuum and Surface Sciences Conference of Asia and Australia (VASSCAA-4), 2008年10月28日 (松江).
- [35] Y. Kitaoka, S. Yoshimoto, T. Hirahara, S. Hasegawa, and T. Ohba: *Nanometer-scale Four-Point Probe Resistance Measurements of Cu Wires Using Carbon Nanotube Tips*, H Advanced Metalization Conference 2008: 18th Asian Session, 2008年10月9日 (東京大学, 本郷).

• **A3 Foresight Program Spring School on 'Sub-10 nm Wires'**, 2008年5月28日 (物性研究所, 柏)

- [36] Y. Kitaoka: *Four-terminal conductivity measurements of nanometer-scale Cu wires*.
- [37] Y. Niinuma: *Gd adsorption on metallic surface superstructures of In/Si(111)*.
- [38] Y. Gu: *Insulating ground state of Sn/Si(111) observed by conductivity measurements with micro-four-point probes*.
- [39] N. Nagamura, T. Shibusaki, H. Okino, S. Yamazaki, Y. K. Kim, T. Hirahara, I. Matsuda, G. S. Lee, and S. Hasegawa: *Influence of defects on the phase transition of Si(111) $4 \times 1$ -In*.
- [40] T. Komorida, T. Hirahara, A. Sato, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, K. He, I. Matsuda, T. Nagao, and S. Hasegawa: *Manipulating quantum-well states by surface alloying: Pb on ultrathin Ag films*.

• **The Eighth Russia-Japan Seminar on Semiconductor Surfaces (RJSSS-8)**, 2008年10月20-21日、東北大学

- [41] K. Takase, N. Miyata, S. Nishide, H. Narita, M. Ogawa, A. Kakizaki, S. Hasegawa and I. Matsuda: *Conductivity of the Si(111) $7 \times 7$  dangling-bond state*.
- [42] N. Nagamura, T. Hirahara, T. Shibusaki, H. Okino, S. Yamazaki, Y. K. Kim, I. Matsuda, G. S. Lee, and S. Hasegawa: *Influence of defects on the phase transition of Si(111) $4 \times 1$ -In*.
- [43] T. Komorida, T. Hirahara, A. Sato, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, K. He, I. Matsuda, T. Nagao, and S. Hasegawa: *Manipulating quantum-well states by surface alloying: Pb on ultrathin Ag films*.

• **International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-5)**, 2008年11月12日、早稲田大学

- [44] K. Takase, T. Shibusaki, T. Hirahara, S. Hasegawa: *Detection of Kondo effect in Co/Si(111) $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ -In Surface by surface-sensitive conductivity measurements*.

- [45] N. Miyata, C. M. Wei, K. Horikoshi, T. Hirahara, S. Hasegawa, I. Matsuda: *Electronic Transport of Quantum-Well States in Ultrathin Pb (111) films*.
- [46] Y. Gu, T. Hirahara, H. Morikawa, S. Hasegawa: *An insulating ground state of  $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Sn}$  revealed by micro-four-point probe conductivity measurements*.
- [47] N. Nagamura, T. Hirahara, T. Shibasakhi, H. Okino, S. Yamazaki, Y. K. Kim, I. Matsuda, G. S. Lee, and S. Hasegawa: *Influence of defects on the phase transition of  $\text{Si}(111)4 \times 1\text{-In}$* .
- [48] T. Komorida, T. Hirahara, A. Sato, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, K. He, I. Matsuda, T. Nagao, and S. Hasegawa: *Manipulating quantum-well states by surface alloying: Pb on ultrathin Ag films*.
- (国内会議)
- 招待講演
- [49] 平原徹: ビスマス超薄膜のスピン偏極表面電子状態、電気伝導特性に関する研究, 日本物理学会第 64 回年次大会 第 3 回領域 9 若手奨励賞受賞記念講演、立教大学 2009 年 3 月 28 日.
- [50] 長谷川修司: 多探針 STM とナノエレクトロニクス, 第 49 回真空に関する連合講演会, 2008 年 10 月 29 日 (松江).
- [51] 長谷川修司: 物理チャレンジと国際物理オリンピック 実験教育の視点から, 応用物理学会 応用物理教育分科会「サイエンス教育サミット」, 2008 年 8 月 23 日 (東京工科大学, 八王子).
- 一般講演
- 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 29-30 日 (立教大学)
- [52] 北岡佑介、東野剛之、平原徹、長谷川修司: 金属被覆 CNT 探針を用いた  $\text{FeSi}_2$  ナノワイヤーの四端子電気伝導測定.
- [53] 東野剛之、北岡佑介、吉本真也、平原徹、大場隆之、長谷川修司: 金属被覆 CNT 探針を用いたダマシン銅ワイヤーのナノメーター電気伝導測定.
- [54] 小森田拓、平原徹、Yan Gu、長谷川修司: ナトリウムを吸着した  $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Sn}$  表面の研究.
- [55] 新沼優人、平原徹、長谷川修司: SMOKE 装置の開発と  $\text{Gd/In/Si}(111)$  金属表面の磁性研究.
- 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 22 日 (岩手大学)
- [56] Yan Gu, 平原徹, 長谷川修司: 表面状態電気伝導測定による  $\text{Sn/Si}(111)$  の基底状態の研究.
- [57] 平原徹, 新沼優人, 長谷川修司: 超高真空低温型表面磁気光学カー効果測定装置の開発.
- [58] 高瀬恵子, 平原徹, 長谷川修司: 磁性体吸着した金属表面  $\text{Si}(111)\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-In}$  の電気伝導.
- [59] 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 - .
- [60] 永村直佳, 芝崎剛豪, 沖野泰之, 山崎詩郎, Y. K. Kim, 平原徹, 松田巖, G. S. Lee, 長谷川修司:  $\text{Si}(111)4 \times 1\text{-In}$  表面の相転移と欠陥の効果 II.
- 日本表面科学会学術講演会, 2008 年 11 月 14 日 (早稲田大学)
- [61] 平原 徹, 宮本 幸治, 木村 昭夫, 新沼 優人, Bihlmayer Gustav, Chulkov E V, 長尾 忠昭, 松田 巖, Qiao S, 島田 賢也, 生天目 博文, 谷口 雅樹, 長谷川 修司: Bi 超薄膜におけるスピン軌道相互作用と表面状態.
- [62] 高瀬 恵子, 芝崎 剛豪, 平原 徹, 長谷川 修司: 不純物を導入した金属表面  $\text{Si}(111)\sqrt{7} \times \sqrt{3}\text{-In}$  の電気伝導度測定.
- [63] 小森田拓, 平原徹, 佐藤礼奈, Bihlmayer Gustav, Chulkov E V, He Ke, 松田巖, 長谷川修司: 表面合金化による量子井戸状態の制御: Pb/Ag 超薄膜.
- (講義等)
- [64] 長谷川修司: 半導体表面 ナノサイエンス・ナノテクノロジーの舞台, 東京理科大学理工学部物理学科特別講義, 2009 年 1 月 15 日、東京理科大学 (野田).
- [65] 長谷川修司: 兵庫県立大学理学部集中講義「表面科学」2008 年 8 月 20-22 日.
- [66] 長谷川修司、平原徹、小森田拓 (TA)、東野剛之 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 真空技術、2008 年度夏学期 (本郷).
- [67] 長谷川修司: 現代物理実験学 I (学部 3 年生講義) 2008 年度夏学期 (本郷).
- [68] 長谷川修司: 固体物理学 I (学部 4 年生講義) 2008 年度夏学期 (本郷).
- [69] 長谷川修司: 物理学ゼミナール (学部 3 年生) 2008 年度冬学期 (本郷).

# 1 Hasegawa Group

**Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics**

**Members: Shuji HASEGAWA and Toru HIRAHARA**

Topics in our research group are (1) electronic/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, (5) spin states and magnetism, and (6) epitaxial growths of coherent atomic/molecular layers on semiconductor surfaces and nano-scale phases. Peculiar atomic arrangements and surface electronic states, characteristic of the surface superstructures and ultra-thin films, on semiconductor surfaces, are our platforms for studying physics of atomic-scale low-dimensional systems by using ultrahigh vacuum experimental techniques such as electron diffraction, scanning electron microscopy, scanning tunneling microscopy/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, *in-situ* 4-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-4-point probes, and surface magneto-optical Kerr effect measurements. Main results in this year are as follows.

**(1) Surface electronic transport:** Kondo effect and RKKY interaction in surface-state conduction. Surface-state conductivity of topological insulators. Metal-insulator transitions, hopping conduction, and a Mott insulator in surface states. Quantitative evaluation of surface-state conductivity from Fermi surface mapping. Quasi-ballistic transport at a Fe-silicide nanowires.

**(2) Surface phases, ultra-thin films, and phase transitions:** Order-disorder phase transition, charge-density-wave transition, Mott transition on various metal-induced surface superstructures of Si. Quantum-well state in ultra-thin Pb, Bi, and Ag films. Rashba effect in surface state and hybridization with quantum-well states in thin films.

**(3) Surface magnetism:** Monolayer ferromagnetic surfaces. Diluted magnetic surface states.

**(4) Construction of new apparatuses:** Green's-function STM (low-temperature four-tip STM), Magneto-optical Kerr effect apparatus. Magneto-resistance with micro-four-point probes apparatus.

- [1] K. He, T. Hirahara, T. Okuda, S. Hasegawa, A. Kakizaki, and I. Matsuda: *Spin-polarization of quantum well states in Ag films induced by Rashba effect at surface*, Physical Review Letters **101**, 107604 (Sep, 2008).
- [2] H. Morikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Absence of Charge-Density Waves on the Dense Pb/Ge(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  Surface*, Physical Review B **77**, 193310 (May 2008).
- [3] 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*, Physical Review B **78**, 035408 (Jul 2008).
- [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*, Physical Review B **78**, 035326 (Jul, 2008).
- [5] 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*, Physical Review B **78**, 245405 (Dec, 2008).
- [6] M. D'angelo, K. Takase, T. Hirahara, S. Hasegawa, and I. Matsuda: *Conductivity of the Si(111)7 $\times$ 7 dangling-bond state*, Physical Review B **79**, 035318 (Jan, 2009).
- [7] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Localization and Hopping Conduction at Glass and Crystal Phases of Monatomic Au Layers on Silicon Surface*, Physical Review B **79**, 085317 (Feb, 2009).
- [8] T. Hirahara, K. Miyamoto, A. Kimura, Y. Niinuma, G. Bihlmayer, E. V. Chulkov, T. Nagao, I. Matsuda, S. Qiao, K. Shimada, H. Namatame, M. Taniguchi, and S. Hasegawa: *Origin of the surface-state band-splitting in ultrathin Bi Films: From a Rashba effect to a parity effect*, New Journal of Physics **10**, 083038 (Aug, 2008).
- [9] Y. Kakefuda, K. Narita, T. Komeda, S. Yoshimoto, and S. Hasegawa: *Self-assembled Nanowire Arrays of Gold Nanoparticles*, Applied Physics Letters **93**, 163103 (Oct, 2008).
- [10] C. Liu, I. Matsuda, T. Hirahara, S. Hasegawa, J. Okabayashi, S. Toyoda, and M. Oshima: *Band-bending inhomogeneity of Au adsorbed Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag evaluated with Si 2p core-level spectra*, Surface Science **602**, 3316 (Sep, 2008).
- [11] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Growth, Quantum confinement and Transport mechanisms of Ge nanodot arrays formed on a SiO<sub>2</sub> monolayer* (Review), e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **6**, 191 (Aug, 2008).

## 第I部

# 2006年度 物理学教室全般に関する報告





# 第1章 2006年度に開講された学部講義概要

## 1.0.1 固体物理 I : 長谷川修司

- |                            |                      |
|----------------------------|----------------------|
| 1. 概論                      | 4.1 走査トンネル顕微鏡の原理     |
| 2. 表面構造                    | 4.2 表面原子構造観察         |
| 2.1 表面超構造と相転移              | 4.3 局所電子状態測定         |
| 2.2 回折法                    | 4.4 表面バンドの観測         |
| 2.3 顕微鏡法                   | 4.5 表面電子定在波          |
| 2.4 動的過程                   | 5. 表面電子輸送            |
| 3. 表面電子状態                  | 5.1 表面空間電荷層の2次元電子系   |
| 3.1 表面電子状態                 | 5.2 表面電子バンドの2、1次元電子系 |
| 3.2 (逆)光電子分光法              | 5.3 原子マニピュレーション      |
| 3.3 トンネル分光法                | 6. 表面超薄膜磁性           |
| 3.4 光電子分光によるバンド分散・原子結合状態測定 | 6.1 磁気モーメントと相転移      |
| 3.5 時間分解測定                 | 6.2 強磁性超薄膜           |
| 2. 走査トンネル顕微鏡               | 6.3 表面ナノ強磁性体         |

## 1.0.2 現代実験物理学 I : 長谷川修司, 溝川貴司

- |                               |                 |
|-------------------------------|-----------------|
| 1. X線                         | 3.3 伝導          |
| 1.1 X線の発見、                    | 4. 磁場を利用する実験技術  |
| 1.2 特性X線と連続X線、Moseleyの法則、     | 4.1 磁場の発生       |
| 1.3 Thomson散乱とCompton散乱、      | 4.2 SQUIDとMEG   |
| 1.4 X線回折                      | 4.3 NMRとMRI     |
| 1.5 X線研究の拡がり; CT, リソグラフィ、宇宙X線 | 5. 電磁波を利用する実験技術 |
| 2. 電子                         | 5.1 光源技術        |
| 2.1 粒子性と波動性                   | 5.2 ポンプ・プローブ分光  |
| 2.2 電子回折と顕微鏡                  | 5.3 X線散乱        |
| 2.3 Aharonov-Bohm効果           | 6. 粒子線を利用する実験技術 |
| 2.4 トンネル効果とSTM                | 6.1 電子線散乱       |
| 3. 多様な実験手法                    | 6.2 光電子分光       |
| 3.1 顕微鏡                       | 6.3 中性子散乱       |
| 3.2 分光法                       | 6.4 $\mu$ SR    |