

1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として宮田伸弘と細村嘉一が新しくメンバーに加わり、平原徹と吉本真也が修士課程を修了して博士課程に進学した。9月には科学技術振興機構研究員 Alexander Konchenko がロシアに帰国し、12月には、博士課程3年生の守川春雲が中退し、当大学院化学専攻岩澤研究室の助手として転出した。

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。特に、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、それらに固有の電子バンドの電子輸送特性を明らかにし、バルク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、表面近傍での電子励起、エレクトロマイグレーションなどの表面質量輸送現象など、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

高分解能光電子分光による自由電子的表面状態の電気伝導の研究

$\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Ag}$ はフェルミ準位を横切る放物線的なバンドを持つ二次元自由電子的な金属的表面である。これまでの電気伝導測定によって、(1)Agなどの貴金属原子を極微量吸着させて $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相を作ると表面電気伝導度が増加し、さらに(2)室温から約150Kまで冷却すると表面伝導度が増加する金属的な性質を示すことが見出されてきた。そこでこれに対応する電子状態の変化を高分解能光電子分光法によるバンド及びフェルミ面マッピングで定量的に調べた。電気伝導度は最も単純には系の全価電子数と移動度に比例する Drude モデルで表されるが、我々は2次元 Boltzmann 方程式をもとに、より一般的でしかも光電子分光の結果と比較し易い以下の式を導出した。

$$\sigma = \frac{e^2}{2} \cdot (\tau \cdot v_F) \cdot v_F \cdot D. \quad (1.1.1)$$

これにより電気伝導度 (σ) はフェルミ準位での状態密度 (D)、フェルミ速度 (v_F)、緩和時間 (τ) で書ける。まず、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相から $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相に変化したとき、追加蒸着された原子からの電子ドーピングにより、フェルミ面の円の半径が増大するとともに逆格子空間での周期性が縮小してバンドの折り返しが起こり、多数キャリアの振る舞いが電子的からホール的へと変化するのを発見した。この測定により得られた D と v_F 、および τ から上式に基づいて表面状態の電気伝導度を見積もった結果、いままでに測定された電気伝導度と定量的に一致していること

が分かった。一方、表面電気伝導の温度変化は、光電子ピークのエネルギー幅の温度依存性から電子格子相互作用に起因する τ の変化に対応していることが確認された。

自由電子的表面状態のホール効果の測定

上述のように、 $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Ag}$ から $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 表面構造への変化に従って、フェルミ面の折り返しによって表面状態の多数キャリアの振る舞いが電子的からホール的へと変化するを見出した。そこで、この多数キャリアの変化を実際に検出するため超高真空超伝導マグネットチャンバーを立ち上げ、マクロ4端子法による磁場中でのホール効果測定を行った。端子間隔が数 mm であるため、下地基板の寄与が大きく、表面状態の成分だけを取り出してホール係数の符号反転を直接検出することはできなかったが、Two Layer Model に基づく定量的な解析の結果、この構造変化に伴い測定されたホール係数の変化は基板の表面空間電荷層の変化とは逆で、表面状態から予測された変化と一致していた。これは表面状態でのホール効果検出に初めて成功したことを意味する。

室温から極低温までの $\text{Si}(111)\text{-Au}$ 表面上のガラス・結晶転移での電気伝導

1 原子層の Au を蒸着した $\text{Si}(111)\text{-Au}$ 表面はガラス・結晶転移を起こす。すなわち熱処理のみで 6×6 表面 (結晶相) と $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面 (ガラス相) を可逆的に作り変えることができる。本研究では両表面の表面状態電気伝導度 (σ_{ss}) を室温から約 10K まで測定した。その結果 6×6 表面は $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面より高い σ_{ss} を持ち、特に約 100K 以下の熱活性型ホッピング伝導が起こっている温度領域では約 3 倍となった。また、15K 以下で $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面 (ガラス相) のみが Mott 型の可変領域ホッピング伝導と考えられる伝導に切り替わることが判った。そのことは $\beta\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面 (ガラス相) には乱れによってフェルミ面近傍に局在した電子状態が形成されたとことを示唆しており、現在その存在を STM および光電子分光法を用いて探索している。

室温から極低温までの $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$ 表面の電気伝導

2/3 原子層の Au を蒸着した $\text{Si}(111)\text{-}\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Au}$ 表面は金属的な表面バンドを持つことが光電子分光法からわかっている。この表面の表面状態電気伝導度 σ_{ss} の温度依存性を測定したところ、室温から 110K までは温度の逆数に比例する金属的な振る舞いを示すが、約 110K で鋭い金属絶縁体転移を示し、約 110K から 15K までは半導体的な熱活性型の温度依存性を示した。STM による観察からこの表面は金属的な部分が分域境界によって細かく分断されていることが

判っている。現在金属絶縁体転移のメカニズムの解明を目指し、分域境界による局在化や金属半導体ネットワークに基づく解析を行っている。

Si(111)-7×7 清浄表面上の Na の吸着と電気伝導

昨年度、Si(111)-7×7 清浄表面上に Na を微量吸着させる過程での高分解能光電子分光測定を行った結果、Na 原子から供給された電子によって half-filled のダングリングボンド状態の電子占有度があがって最後には充満帯になってしまうこと、コーナーホール周りのダングリングボンドが優先的に電子供給を受けることなどがわかった。この過程での表面電気伝導度をマイクロ 4 端子プローブ法で測定したところ、Na の吸着量の増加に伴って伝導度が減少することがわかった。これは、上述の光電子分光法の測定結果を考え合わせると、ダングリングボンド状態による電気伝導が消滅したとよると考えられる。なお、この過程での表面空間電荷層の伝導度の変化は無視できるくらい微小であった。

β-SiC(001) 表面の電気伝導

β-SiC(001) 表面は、Si 原子の被覆率や加熱温度に依存してさまざまな表面超構造をとることが知られているが、それらの表面に対して温度可変マイクロ 4 端子プローブ法による伝導度測定を行った。その結果、電気抵抗値は表面構造に依存して著しく異なり、Si-rich 3×2 表面が最も高い伝導度を示した。また、3×2 と 2×1 表面の伝導度は半導体的な温度依存性を示すこともわかった。

コバルトシリサイド・ナノワイヤの電気伝導特性

近年、ボトムアッププロセスによる微細化を狙って、ナノワイヤ、ナノチューブの研究が精力的に行われている。金属的なナノワイヤは素子間の配線やナノ電極として、半導体的なナノワイヤはトランジスタなどの素子としての利用が考えられている。本研究では Si(110) 表面に 750°C で Co を蒸着して自己組織的に作製される金属的な CoSi₂ ナノワイヤの電気伝導特性を独立駆動型 4 探針 STM(走査トンネル顕微鏡) によって室温で測定した。平均的なナノワイヤの大きさは、幅 60nm、長さ 5μm であった。測定の結果、ナノワイヤと Si 基板はショットキー障壁によって電氣的に良く絶縁されていることがわかり、また、大気に晒した後でもナノワイヤの抵抗率がほとんど変わらないこともわかった。抵抗率は室温で約 30μΩcm と十分小さく、これらの結果から Si 基板上に作製した CoSi₂ ナノワイヤは将来のナノデバイスへの応用が期待できる。今後はより細いナノワイヤの作製と評価、並びに Ni, Fe などの物質の金属的、半導体的なナノワイヤの作製と評価、量子効果の観測を行う予定である。

Ag 探針から形成した局所表面構造での I V 特性

超高真空中で Ag 探針を高温の Si 結晶表面に接触させると、Ag 原子が Si 表面上に輸送され、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 吸着表面構造のパッチを局所的に作る事ができる。昨年度は、このときの Ag 探針と Si 表面との間の電流電圧 (I V) 特性を室温で測定し、その結果はダイオードモデルで説明できた。今年度は、この手法を用いて多探針の測定を行った。Ag 探針によって $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 構造のパッチを 2 箇所つくり、2 探針測定した場合でも同様にダイオードモデルで説明でき、I V 特性は 2 つのダイオード特性の重ね合わせにより得られた。 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 構造のパッチを作らずに直接 7×7 清浄表面に探針を接触させて 4 探針測定すると非常に不安定で測定不能であったが、各探針の接触部に $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 構造のパッチを作成すると安定した 4 探針測定が可能となった。その測定された抵抗率は、バルクの抵抗率より 2 桁ほど大きい値であり、表面空間電荷層および表面状態を測定していると思われる。

金属被覆カーボンナノチューブ STM 探針の評価

当研究室で開発した 4 探針 STM 装置は、SEM(走査電子顕微鏡) 中で 4 つの独立駆動する STM ヘッドを持ち、ナノ構造体の電気特性を調べるのに非常に有効である。しかし、通常の W 探針は先端の直径が 100 nm 程度であるため、それ以下の距離に探針どうしを近づけることができず、ナノメートルスケールの多探針測定ができない。そこで、半径が 10 nm 程度で、アスペクト比が非常に高く、機械的に安定なカーボンナノチューブ (CNT) を W 探針の先端に接合して利用すると、多探針測定時の探針間距離を 1/10 程度 (~20 nm) まで縮めることができると期待される。しかし、通常、W 探針と CNT の接合部分の電気抵抗が大きく、STM や電気伝導測定に不向きである。そこで、本研究では大阪大学工学部尾浦研究室と共同で、W 探針および接合した CNT 全体を数 nm の金属薄膜で被覆した「金属被覆 CNT 探針」を作成し、その探針自身の電気伝導特性及び機械的強度について評価を行った。

W 探針と CNT の接合は SEM/STM 複合装置を用いて行い、その後パルスレーザー蒸着法 (PLD) によって W や PtIr をそれぞれ 5~6 nm の膜厚で被覆した。これらの W 被覆 CNT 探針、PtIr 被覆 CNT 探針、および比較のため金属被覆無し CNT 探針について、4 探針 STM を用いて電気伝導特性の評価を行った。その結果、PtIr 被覆を行った場合には接合部の抵抗が 0.2k ~ 25k と金属被覆無し (60 kΩ ~ 数百 kΩ) に比べ著しく低下し、被覆材料として非常に有効であった。また、この探針を 100 回ほど金属試料に接触させて電流・電圧測定を行っても探針が壊れることがなく、十分な強度を保っていることが分かった。W 被覆 CNT 探針は被覆前と同程度の抵抗を示し、これは酸化の影響と考えられる。また、現状で確認している最小探針間隔は 50nm であり、SEM の分解能を高めて、これをさらに縮めること、CNT の取り付け向きの制御性などの向上を目指して開発

を行っていく予定である。(大阪大学工学研究科尾浦研究室との共同研究)

1.1.2 表面構造と相転移

Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Au) 表面の構造モデル

Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上に 0.1~0.2 原子層程度の Au 原子を吸着させると、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Au) 表面超構造が現れる。この表面超構造の原子配列について今まで 4 つの原子構造モデルが提出されているが、決着していない。今までの研究は、この表面構造そのものに限られていたが、本研究では、この表面構造の形成過程について詳細の観察した。つまり、Au 原子の吸着量が極めて少なく、 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 超構造が形成される前の段階の様子を低温 STM で観察した。Au の吸着量が 0.02ML 程度では表面上に三回対称性を持つプロペラ状のクラスタが散在した。吸着量が 0.14ML 程度になると、このクラスタが凝集して $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 超構造が形成された。しかもその単位胞は一つのプロペラ状クラスタによって形成されていた。この形成過程は、今までに提唱されているいずれの原子構造モデルでも説明できないことが分かった。その代わりに、我々は新しい構造モデルを提出した。このモデルは Au4f と Si2p の内殻光電子分光法の実験結果と矛盾しないことがわかった。

Pb, Ge/Ge, Si(111)- α - $\sqrt{3} \times \sqrt{3} \leftrightarrow 3 \times 3$ 相転移

2 次元や 1 次元の金属系では、その低次元性ゆえに時に特異な「対称性の破れ」現象が発現する。Ge または Si 結晶の (111) 表面上に 1/3 原子層の Pb または Sn を吸着させて形成される $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面系では、低温において 3×3 相に相転移し、これは電荷密度波転移か秩序無秩序相転移か、数年来表面物理コミュニティで盛んに議論・研究されているが、メカニズムの決着はまだついていない。相転移にはフェルミ面付近の電子状態が密接に関わっているのだが、この系は複雑なバンド構造を持ち、電子状態が明確にされていないからである。本研究では、昨年度までに立ち上げた自動フェルミ面マッピング装置を用いて、室温における電子状態を探った結果、これらの系のフェルミ面は室温においても 3×3 周期に従うことがわかった。続いて、温度可変 $\mu - 4$ 端子プローブ法による室温から 100 K までの表面電気伝導度測定、室温から 6 K までの走査トンネル顕微鏡観察、走査トンネル分光測定を行い、相転移に伴う電子状態変化を追った。その結果、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3} \rightarrow 3 \times 3$ 相転移は、金属-金属相転移であり、金属-絶縁体転移である電荷密度波転移のモデルとは矛盾することがわかった。以上より、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3} \rightarrow 3 \times 3$ 相転移は、電子状態の本質的な 3×3 周期に伴う秩序無秩序型相転移であるといえる。

Ge(111)- β - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb 表面

Ge(111) 表面上に 1 原子層の鉛を吸着させると前述の α 相とは異なる β - $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 構造が形成される。この表面は金属的であり、低温における Peierls 転移が理論的に予言されている。そこで、室温におけるフェルミ面マッピングによってその電子状態を探り、室温及び 6 K における走査トンネル顕微鏡観察でその相転移を探った。その結果、この表面は正六角形のフェルミ面を持ち、良い nesting 条件を満たすにも関わらず、何の相転移も起こさないことがわかった。その原因は nesting vector と格子の整合性にあり、電子格子間の整合性エネルギーが相転移による電子エネルギーの利得より大きいことが原因と結論づけた。

Ge(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag, Au 表面の電子状態

Si(111) 表面上に Ag または Au を吸着させて作られる $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面は最も典型的な金属/半導体表面として知られる。類似の系は Ge(111) 表面上にも形成されるが、その電子状態は殆ど調べられていない。そこで、昨年度までに立ち上げたフェルミ面マッピング装置を用いて、これらの系のフェルミ面、価電子帯の電子状態を探った結果、Ag/Ge(111) 表面上には Ag/Si(111) 表面と同様の自由電子的バンドが見られ、その他細部に渡っても Ag/Si(111) 表面との類似の電子状態が見られた。このことは、Ag/Ge(111) の原子配列が Ag/Si(111) と同じ honeycomb chained triangle 或いは inequivalent-triangle 模型で記述されることを示唆する。一方、Au/Ge(111) 表面上には Au/Si(111) 表面と同様の自由電子バンドが見られたが、その他のバンド構造は Au/Si(111) とは著しく異なり、異なる格子構造を持つことが示唆された。

Si(111)-c(12 × 2)-Ag 表面の低温 STM 観察

Si(111) 表面上に 1/3 原子層の Ag を吸着させた 3×1 -Ag 表面の原子構造を解析するために、65 K で STM 観察を行った。c(12 × 2) 相は 3×1 相 (≥ 500 K) から 6×1 相 (≥ 100 K) を経て、次々に相転移を起こした末の基底状態であるが、STM 観察の結果から、Honeycomb Chain-Channel モデルにしたがう再構成によってよく説明できることがわかった。この構造相転移は、まず表面に平行方向の Ag 原子のゆらぎが凍結し、次いで表面に垂直方向の Ag 原子のゆらぎが凍結することによって起こる二段階の秩序-無秩序相転移であると考えられる。

Si(111) 表面上 Bi 薄膜の高分解能光電子分光測定

Si(111) 表面上に Bi 原子を蒸着させると濡れ層を経て二次元成長によりエピタキシャル薄膜が形成される。5 原子層以下では表面垂直方向に回転の自由度がある {012} 方位の薄膜が、5 原子層以上では (001) 方位の薄膜が成長する。これらの薄膜は膜厚方向の

閉じ込め効果及びストレス緩和のための原子変位によりバルクとは異なる電子状態が実現していると推測される。本研究では高分解能光電子分光法を用いて Bi 薄膜の電子状態測定を行った。{012} 薄膜についてはバルク壁開面と異なり二層同士で結合しダンリングボンドを飽和しているのが半導体的な電子状態が予測されていたが、測定の結果フェルミ準位を横切る金属的なバンドの存在が示唆された。(001) 薄膜については壁開面とほぼ同じバンド構造が測定された。この表面では二つの金属的なバンドがスピン・軌道分裂しているのではないかという報告があるので、それを確かめるためにブリルアンゾーンの対称点で二つのバンドが縮退しているかを調べたが、明確な縮退は見られなかった。

Si(111) 表面上の Pb 薄膜における量子井戸状態

近年、Si(111) 上に成長させた Pb 薄膜において、量子サイズ効果に起因して、膜厚に依存してホール係数の符号が反転したり、伝導度や超伝導転移温度が振動的に変化するなど特異な現象が報告されている。そこで、Si(111) 上に $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb 表面超構造を形成した後、10 原子層程度の Pb 薄膜を成長させ、光電子分光法を用いて、電子状態の膜厚依存性や面内分散を系統的に調べた。 Γ 点での光電子ピークは奇数層膜においてのみ強度が異常に増大し、過去に報告されている 2 層成長様式を示唆する結果となった。また、面内分散を測定して、各奇数層で Γ 点周りにホールポケット、 \bar{K} 点周りに電子ポケットを形成していることもわかり、これは過去のフェルミ面の計算結果とも一致した。

Au 探針と Si 表面の直接接合

超高真空 SEM 中で Si 結晶表面上に Au 探針を直接接合させると、基板温度が Au-Si 共晶点以下では何の変化も生じないが、共晶温度以上では、Au 探針が Si に浸食され、シリサイドと思われるアイランドが表面に形成された。さらに、その周辺にパッチ状に薄膜が形成されてひろがっていった。 μ -RHEED 観察からこの薄膜は Au が $2/3$ 原子層で形成される $\alpha\text{-}\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au 構造であった。また、薄膜パッチの広がりりと加熱時間の関係から拡散係数得られ、その拡散係数の活性化エネルギーは、1.4 eV であった。これは真空蒸着によって形成される薄膜パッチの活性化エネルギー、1.3 eV と同程度であり、同じ熱活性化過程によって薄膜パッチが成長していると考えられる。

Si 表面上でのナノドットの形成と電子状態

Si 結晶表面の 2 原子層程度を酸化させ、その上に Ge を蒸着すると、5 nm 程度の径のナノドットが高密度に形成され、その平均粒径は Ge 蒸着量によって制御することができる。このナノドット系の光電

子分光測定を行い、ドットの平均粒径が小さいほど価電子バンド上端がフェルミ準位から離れることを見出した。これは、ドット内に形成された量子化準位のうちの最高占有状態を検出していることを意味し、量子閉じ込めが実際に起こっていることを実証した。マイクロ 4 端子プローブによる伝導度測定の結果、ナノドット層は伝導に全く寄与しないことがわかった。これは、ドット間が電氣的に接触していないか、あるいは隣接するドットの量子化準位が一致しないために伝導に寄与しないことによると考えられる。

1.1.3 新しい装置の立ち上げ

グリーン関数 STM 装置の開発

液体 He 温度までの低温で動作可能な 4 探針 STM 装置を昨年度より開発している。また、この装置では遅延グリーン関数の測定が可能となる。グリーン関数は輸送現象において本質的な役割を果たしているが、直接測定する手法が無かった。グリーン関数測定のためには、2 本以上の探針を電子のコヒーレント長以内まで近づけ、1 つの探針に与えられた電気信号を他の探針で検出する必要があり、10 pA オーダーの高精度のトンネル電流検出機構、液体ヘリウム程度の低温、数十 nm まで近づけられる鋭い探針が要求される。昨年度までに、真空装置や SEM の設置は完了しており、今年度は、SEM の分解能向上、STM 単体での動作を確認した。また、探針製作法を工夫し、多探針 STM に最適な探針を安定して作成できるようになった。来年度は、室温から液体ヘリウム温度までの温度範囲で表面電気伝導度測定を行うとともに、実空間における遅延グリーン関数のイメージングを目指す。

電子輸送中のフェルミ面測定システムの立ち上げ

本研究では、固体表面の電気伝導を測定する新しい実験技術を開発する。通常、金属の電気伝導はボルツマン方程式を通じて、金属のフェルミ面のずれに対応している。この考え方は長年周知であったが、そのフェルミ面の様子を直接観測されたことはない。そこで、超高分解能電子分析器を用いた光電子フェルミ面マッピング法により、電場印加中のこのフェルミ面の“ずれ”を直接測定し、系の電子輸送現象の研究を行う。本年度はこの実験に必要な超高真空中での電場印加システムの立ち上げを行った。

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。

- ・科研費 基盤研究 S 「グリーン関数 STM の開発とそれによるナノ電子輸送ダイナミクスの研究」(代表者 長谷川修司)
- ・科研費 若手研究 A 「半導体表面上ナノ構造のフェルミオロジー」(代表者 松田巖)
- ・科研費 萌芽研究 「新しい表面電気伝導測定法の

開発：電子輸送中のフェルミ面測定」(代表者 松田 巖)

・科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発事業「4 探針 STM の制御系および多機能ナノチューブ探針の開発」(代表者 長谷川修司)

・科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業「超高密度・超微細ナノドット形成とナノ物性評価技術」(代表者 市川昌和)

< 報文 >

(原著論文)

- [1] I. Matsuda, M. Ueno, T. Hirahara, R. Hobara, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Electrical Resistance of a Monatomic Step on a Crystal Surface*, Physical Review Letters **93**, 236801 (2004).
 - [2] T. Tanikawa, I. Matsuda, T. Kanagawa, and S. Hasegawa: *Surface-state electrical conductivity at a metal-insulator transition on silicon*, Physical Review Letters **93**, 016801 (2004).
 - [3] T. Nagao, J. T. Sadowski, M. Saito, S. Yaginuma, Y. Fujikawa, T. Kogure, T. Ohno, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, and T. Sakurai: *Nanofilm Allotrope and Phase Transformation of Ultrathin Bi Film on Si(111)-7 × 7*, Physical Review Letters **93**, 105501 (2004).
 - [4] H. Morikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Direct observation of soliton dynamics in charge density waves on a quasi-one-dimensional metallic surface*, Physical Review B **70**, 085412 (2004).
 - [5] H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, T. Kanagawa, S. Hasegawa, J. Okabayashi, S. Toyoda, M. Oshima, and K. Ono: *Nonmetallic transport of a quasi-one-dimensional metallic Si(557)-Au surface*, Physical Review B **70**, 113404 (2004) (Subsequently selected to appear in Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology **10**, (2004)).
 - [6] C. Liu, S. Yamazaki, R. Hobara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Two-Dimensional Liquid-Solid Phase Transition Observed on Atomic Scale*, Physical Review B **71**, 041310(R) (2005).
 - [7] A.A. Saranin, A.V. Zotov, I.A. Kuyanov, V.G. Kotlyar, M. Kishida, Y. Murata, H. Okado, I. Matsuda, H. Morikawa, N. Miyata, S. Hasegawa, M. Katayama, and K. Oura: *Reversible structural transitions at the one-monolayer Tl/Si(100)2 × 1 interface*, Physical Review B **71**, 165307 (2005).
 - [8] T. Hirahara, I. Matsuda, M. Ueno and S. Hasegawa: *The effective mass of a free-electron-like surface state of the Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface investigated by photoemission and scanning tunneling spectroscopies*, Surface Science **563**, 191-198 (2004).
 - [9] C. Liu, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *STM observation at initial stage of Cs adsorption on Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*, Surface and Interface Analysis **37**, 101-105 (2005).
 - [10] R. Hobara, S. Yoshimoto, T. Ikuno, M. Katayama, N. Yamauchi, W. Wongwiriyanpan, S. Honda, I. Matsuda, S. Hasegawa, and K. Oura: *Electronic Transport in Multiwalled Carbon Nanotubes Contacted with Patterned Electrodes*, Japanese Journal of Applied Physics **43**, L1081-L1084 (2004).
 - [11] M. Konishi, I. Matsuda, C. Liu, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *A $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ phase formed by Na adsorption on Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface and its electronic structure*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 107-112 (2005).
 - [12] N. Miyata, I. Matsuda, M. D'angelo, H. Morikawa, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *STM observation of the Si(111)-c(12 × 2)-Ag surface*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 151-155 (2005).
 - [13] F. Shimokoshi, I. Matsuda, S. Hasegawa, and S. Ino: *Successive Phase Transitions Induced by Ca and Sr Adsorptions on a Si(111) Surface*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 178-185 (2005).
 - [14] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, Y. Hosomura, S. Hasegawa, and P. A. Bennett: *In situ resistance measurements of epitaxial cobalt silicide nanowires on Si(110)*, Applied Physics Letters, in press (June 2005).
 - [15] I. Matsuda, T. Hirahara, M. Konishi, C. Liu, H. Morikawa, M. D'angelo, S. Hasegawa, T. Okuda, and T. Kinoshita: *Evolution of Fermi surface by electron doping into a free-electron-like surface state*, Physical Review B, in press (July 2005).
 - [16] M. D'angelo, M. Konishi, I. Matsuda, C. Liu and S. Hasegawa: *Alkali metal-induced Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ structure: the Na case*, Surface Science, in press.
 - [17] Y. Murata, S. Yoshimoto, M. Kishida, D. Maeda, T. Yasuda, T. Ikuno, S. Honda, H. Okado, R. Hobara, I. Matsuda, S. Hasegawa, K. Oura, and M. Katayama: *Exploiting Metal Coating of Carbon Nanotubes for Scanning Tunneling Microscopy Probes*, Japanese Journal of Applied Physics, in press (July, 2005).
- (国内雑誌)
- [18] 守川春雲、松田巖、長谷川修司：シリコン表面上での電荷密度波の格子整合効果とソリトンダイナミクス, 表面科学, **25**, 407-415 (2004).
 - [19] 坂本克好, 名取晃子, 河野勝泰, 長谷川修司: Ag 探針を用いた表面エレクトロマイグレーションの SEM 観察, 表面科学 **25**, 534-540 (2004).
 - [20] 松田巖: 注目の論文「金属-単分子-金属接合の構造および電子状態の直接観察」, 化学 **59**(No.10), 63 (2004).
 - [21] 山崎詩郎、松田巖、沖野泰之、守川春雲、長谷川修司：Au/Si(111) 表面超構造のガラス・結晶化転移での電気伝導の研究、表面科学、in press.

- [22] 長尾忠昭、柳沼晋、J. T. Sadowski、斉藤峯雄、藤川安仁、大野隆央、長谷川修司、櫻井利夫: シリコン表面上の半金属 Bi 超薄膜の同素変態表面科学, in press.
- (著書)
- [23] 長谷川修司 (分担執筆): 物理学大事典 (第 11.8 節表面) (鈴木増雄、荒船次郎、和達三樹編集、朝倉書店) 印刷中.
- [24] S. Hasegawa: Multi-probe scanning tunneling microscopy, in: *Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale*, Eds. S. Kalinin and A. Gruverman, Chap. 8 (Vol. 2), (Springer 2005)、印刷中.
- (学位論文)
- [25] 平原徹: 自由電子的な表面状態の輸送現象と光電子分光 (Surface transport and photoemission spectroscopy of free-electron like surface states) (修士論文)
- [26] 吉本真也: 金属被覆カーボンナノチューブ STM 探針の製作と電気伝導特性評価 (修士論文)
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [27] S. Hasegawa: *Electrical conduction through surface states on silicon*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 23 日 (浜松).
- [28] S. Hasegawa: *Electrical conduction through atomic/nano wires on silicon*, Korean Vacuum Society, 2004 年 8 月 19 日 (Taegu, Korea).
- [29] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon*, IUMRS-ICA (The IUMRS International Conference in Asia)-2004, 2004 年 11 月 16 日 (Shinchi, Taiwan).
- [30] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon*, The First Workshop on Nanoscale Sensing and Manipulation, 2004 年 11 月 18 日 (Tien Lai Spring Resort Hotel, Taiwan).
- [31] S. Hasegawa: *Electronic Transport through Metallic Mono-layers and Atomic Chains*, International Workshop of COE Program on 'New Horizons in Condensed Matter Physics', 2004 年 11 月 30 日 (東京大学).
- [32] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon*, International Conference on Nanoelectronic and Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI), 2005 年 1 月 31 日 (NTT 厚木 R&D Center).
- 一般講演
- [33] C. Liu, S. Yamasaki, R. Hobara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Atomic scale observations of two-dimensional Liquid Solid Phase Transition on the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*, Beijing-TEDA 2004 Scanning Probe Microscopy, Sensors and Nanostructures. 2004 年 5 月 23 日 (Beijing, China)
- [34] I. Matsuda, M. Ueno, H. Okino, and S. Hasegawa: *Temperature Dependence of Surface Electrical Conductance of Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Studied by Micro-Four Point Probe Method*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 21 日 (浜松).
- [35] C. Liu, I. Matsuda, T. Hirahara, S. Hasegawa: *Alkali metal adsorptions on Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag Surface*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 21 日 (浜松).
- [36] H. Morikawa, T. Tanikawa, H. Okino, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Role of impurities against a CDW transition on a silicon surface*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 22 日 (浜松).
- [37] T. Hirahara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Photoemission-structure-factor effect for Fermi rings of the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 22 日 (浜松).
- [38] H. Okino., R. Hobara, I. Matsuda, T. Kanagawa, S. Hasegawa, J. Okabayashi, S. Toyoda, M. Oshima, and K. Ono: *Electronic transport mechanism of Si(557)-Au surface*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 22 日 (浜松).
- [39] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Surface electron transport study of a glass-crystal transition of Au/Si(111)*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 22 日 (浜松).
- [40] M. D'angelo, M. Konishi, I. Matsuda, C. Liu, and S. Hasegawa: *Alkali-metal induced $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ superstructures on Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface: the Na case*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 22 日 (浜松).
- [41] A. Konchenko, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa: *Formation and properties of ultra small Ge and Mn dots on Si(111)*, The 12th International Conference on Solid Films and Surfaces (ICSFS-12), 2004 年 6 月 24 日 (浜松).
- [42] H. Morikawa, T. Tanikawa, H. Okino, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Role of impurities against the phase transition of In/Si(111)- $4 \times 1 \rightarrow 8 \times 2'$* , The 16th International Vacuum Congress(IVC-16) / 12th International Conference on Solid Surfaces(ICSS-12) / 8th International Conference on Nanometer-scale Science and Technology(NANO-8) / 17th Vacuum National

- Symposium(AIV-17), 2004年6月30日 (Venice, Italy).
- [43] I. Matsuda, M. Ueno, T. Hirahara, H. Morikawa, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Resistance of a Monatomic Step on a Crystal Surface*, The 16th International Vacuum Congress(IVC-16) / 12th International Conference on Solid Surfaces(ICSS-12) / 8th International Conference on Nanometer-scale Science and Technology(NANO-8) / 17th Vacuum National Symposium(AIV-17), 2004年7月2日 (Venice, Italy).
- [44] T. Hirahara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Brillouin-zone selection for Fermi rings of the $Si(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*, The 14th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics(VUV-14), 2004年7月19日 (Cairns, Australia).
- [45] I. Matsuda, T. Hirahara, M. Konishi, C. Liu, H. Morikawa, M. D'angelo, and S. Hasegawa: *Fermi surface evolved by electron doping from a monovalent atom into a free-electron-like surface state of $Si(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag*, The Sixth Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSS-6), 2004年10月10日 (富山).
- [46] M. D'angelo, I. Matsuda, T. Hirahara and S. Hasegawa: *Na interaction with the $Si(111)-7 \times 7$ surface studied by valence band photoemission*, The Sixth Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSS-6), 2004年10月10日 (富山).
- [47] C. Liu, M. D'angelo, I. Matsuda and S. Hasegawa: *Studies of Au adsorption on the $Si(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*, The Sixth Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSS-6), 2004年10月10日 (富山).
- [48] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Surface electronic transport study of a glass-crystal transition on $Au/Si(111)$ surface*, The Sixth Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surfaces (JRSS-6), 2004年10月10日 (富山).
- [49] N. Miyata, I. Matsuda, H. Morikawa, T. Hirahara, M. D'angelo, and S. Hasegawa: *STM observation of the $Si(111)-c(12 \times 2)$ -Ag surface*, The 6th Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surface (JRSS-6), 2004年10月13日 (富山).
- [50] A. A. Saranin, A. V. Zotov, I. A. Kuyanov, V. G. Kotlyar, T. V. Kasyanova, M. Kishida, Y. Murata, H. Okado, I. Matsuda, H. Morikawa, N. Miyata, S. Hasegawa, M. Katayama and K. Oura: *Phase transitions in $Tl/Si(100)$ system*, The 6th Japan-Russia Seminar on Semiconductor Surface (JRSS-6), 2004年10月13日 (富山).
- [51] M. D'angelo: *Transport électronique des surfaces et nanostructures de surface de semi-conducteurs*, Journées Scientifiques Francophones, 2004年11月14日 (東京).
- [52] H. Okino, Y. Hosono, I. Matsuda, S. Hasegawa, P. A. Bennett: *In situ resistance measurement of epitaxial silicide nanowires*, Fall MRS Meeting, 2004年11月25日 (Boston, USA).
- [53] H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, T. Kanagawa, S. Hasegawa: *Electronic Transport Mechanism of $Si(557)$ -Au Surface*, International Workshop of COE Program on 'New Horizons in Condensed Matter Physics', 2004年11月29日 (東京大学).
- [54] S. Yoshimoto, H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, Y. Murata, M. Kishida, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, H. Okado, M. Katayama, K. Oura, and S. Hasegawa: *Electrical Characterization of Metal-Coated Carbon Nanotube Tip*, The 12th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, 2004年12月9日 (熱川).
- [55] Y. Murata, M. Kishida, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, H. Okado, M. Katayama, K. Oura, S. Yoshimoto, R. Hobara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Metal-Coated Carbon Nanotube Tip towards Multi-Tip STM Prober*, The 12th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, 2004年12月9日 (熱川).
- [56] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon*, Symposium on Surface Physics 2005, 2005年1月27日, Shizuokuishi, Japan.
- (国内会議)
- 招待講演
- [57] 長谷川修司: 表面電気伝導 -原子レベル欠陥の影響-, ISSP ワークショップ「ナノスケール表面物性の現状と展望」 2004年8月4日 (東京大学物性研究所).
- [58] 松田巖: 結晶表面上単原子ステップの電気抵抗、日本物理学会秋季大会、領域9特別講演、2004年9月14日 (青森大学).
- [59] 長谷川修司: 表面原子ステップでの電気抵抗、第25回表面科学セミナー (日本表面科学会)、2004年10月8日 (東京理科大学、神楽坂).
- [60] 長谷川修司: 表面ナノ構造の電気伝導、日本真空協会連合講演会、2004年10月29日 (大阪大).
- [61] 長谷川修司: ナノプローブ4探針STM、日本表面科学会東北支部講演会、2005年3月10日 (日本大学、郡山).
- 一般講演
- [62] 長谷川修司: さきがけ研究のその後、さきがけ研究「構造と機能物性」領域研究会、2004年8月6日 (東レ総合研修センター、三島).
- [63] 劉燦華, Marie D'angelo, 松田巖, 長谷川修司: 金原子吸着した $Si(111)-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面についての研究、日本物理学会 第59回年次大会、2004年9月14日 (青森大学).

- [64] 坂本克好, 名取晃子, 河野勝泰, 長谷川修司: 金属 tip を用いた薄膜形成の UHV-SEM による観察, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 2004 年 9 月 13 日 (青森大学).
- [65] M. D'angelo, I. Matsuda, T. Hirahara and S. Hasegawa: 1. Na interaction with the Si(111)-7x7 surface studied by valence band photoemission, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 2004 年 9 月 14 日 (青森大学).
- [66] 守川 春雲, 松田 巖, 長谷川 修司: 室温 ~ 極低温 STM/STS による Ge(111) 表面上 Pb, Sn 吸着系 $\sqrt{3} \times \sqrt{3} \rightarrow 3 \times 3$ 相転移の電子状態研究, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 2004 年 9 月 14 日 (青森大学).
- [67] 保原麗, 吉本真也, 松田巖, 長谷川修司: 低温型四探針 STM による電気伝導測定, 日本物理学会 第 59 回年次大会, 2004 年 9 月 14 日 (青森大学).
- [68] 平原徹, 松田巖, 小西満, Marie D'angelo, 長谷川修司: 一価金属吸着 Si(111) 表面上 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 超構造のフェルミ円と表面電気伝導の研究, 日本物理学会秋季大会, 2004 年 9 月 14 日 (青森大学).
- [69] 山崎詩郎, 松田巖, 沖野泰之, 守川春雲, 長谷川修司: Si(111)-Au 表面上のガラス-クリスタル転移の電気伝導度測定, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 2004 年 9 月 20 日 (青森大学).
- [70] 長谷川修司, 松田巖: Si(111)- 3×3 -Ag 表面: 何が問題か?, ISSP ワークショップ「Si(111)- 3×3 -Ag 構造と相転移」, 2004 年 12 月 15 日 (東京大学, 柏).
- [71] 松田巖, 劉燦華, 平原徹, 長谷川修司: Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の電気伝導 II, 日本物理学会第 60 回年次大会, 2005 年 3 月 24 日 (東京理科大学, 野田).
- [72] 平原徹, 松田巖, 保原麗, 吉本真也, 長谷川修司: 表面状態のホール抵抗測定, 日本物理学会第 60 回年次大会, 2005 年 3 月 24 日 (東京理科大学, 野田).
- [73] 沖野泰之, 松田巖, 保原麗, 細村嘉一, Zhian He, P. A. Bennett, 長谷川修司: CoSi₂ ナノワイヤの電気伝導特性, 日本物理学会 第 60 回年次大会, 2005 年 3 月 24 日 (東京理科大学, 野田).
- [74] 山崎詩郎, 松田巖, 沖野泰之, 守川春雲, 長谷川修司: 室温から極低温までの Au/Si(111) 表面の表面電子輸送研究, 日本物理学会 2005 年 年次大会, 2005 年 3 月 26 日 (東京理科大学, 野田).
- [75] 吉本真也, 保原麗, 松田巖, 村田裕也, 岸田優, 生野孝, 前田大輔, 保田達郎, 本多信一, 片山光浩, 尾浦憲治郎, 長谷川修司: 金属被覆カーボンナノチューブ探針の電気伝導特性, 日本物理学会春季大会, 2005 年 3 月 24 日 (東京理科大学, 野田).
- [76] 宮田伸弘, 松田巖, 平原徹, 長谷川修司: 光電子分光による Si 上の Pb 薄膜の量子井戸状態の研究, 日本物理学会 2005 年 年次大会, 2005 年 3 月 25 日 (東京理科大学, 野田).
- [77] 沖野泰之, 松田巖, 保原麗, 細村嘉一, Zhian He, P. A. Bennett, 長谷川修司: 自己組織化によって作製された CoSi₂ ナノワイヤの電気伝導特性, 第 52 回 応用物理学関係連合講演会, 2005 年 3 月 29 日 (埼玉大学).
- [78] 坂本克好, 名取晃子, 河野勝泰, 長谷川修司: 探針から形成した薄膜の IV 特性, 第 52 回 応用物理学関係連合講演会, 2005 年 3 月 29 日 (埼玉大学).
- [79] 松田巖, 平原徹, 守川春雲, ダンジェロ マリー, 小西満, 長谷川修司: 半導体表面上 2 次元金属単原子層への一価原子吸着と電子移動, 第 24 回日本表面科学会講演大会, 2004 年 11 月 8 日 (早稲田大学).
- [80] 劉燦華, Marie D'angelo, 松田巖, 長谷川修司: 金原子吸着した Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面についての研究, 日本表面科学会 第 24 回表面科学講演大会, 2004 年 11 月 8 日 (早稲田大学).
- [81] 守川 春雲, 沖野 泰之, 山崎 詩郎, 松田 巖, 長谷川 修司: Pb または Sn 吸着 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面構造の低温における 3×3 相転移とそれに伴う電子状態の変化, 第 24 回表面科学講演大会, 2004 年 11 月 10 日 (早稲田大学).
- [82] 平原徹, 松田巖, 小西満, Marie D'angelo, 長谷川修司: Si(111) $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -Ag 超構造のフェルミ円と電気伝導の研究, 第 24 回表面科学講演大会, 2004 年 11 月 9 日 (早稲田大学).
- [83] 山崎詩郎, 松田巖, 沖野泰之, 守川春雲, 長谷川修司: Au/Si(111) 表面構造のガラス・結晶化転移での電子輸送, 第 24 回表面科学講演大会, 2004 年 11 月 9 日 (早稲田大学).
- [84] 宮田伸弘, 松田巖, 平原徹, Marie D'angelo, 守川春雲, 長谷川修司: 低温における Si(111)-c(12x2)Ag 表面の STM 観察, 第 24 回表面科学講演大会, 2004 年 11 月 8 日 (早稲田大学).
- [85] 細村 嘉一, 中山 隆, 長谷川 修司: 松田 巖マイクロ 4 探針プローブ法の数値シミュレーション, 第 24 回表面科学講演大会, 2004 年 11 月 8 日 (早稲田大学).
- (セミナー)
- [86] I. Matsuda: *Electron Transport Measurement on Semiconductor Surfaces in UHV*, 2004 年 10 月 25 日 (Arizona-State University, USA).
- [87] 守川 春雲: 半導体表面上金属ナノ構造の低次元ダイナミクス, 127th SPring-8 セミナー, 2004 年 10 月 15 日 (SPring-8, 兵庫).
- [88] 長谷川修司: 4 探針 STM の制御系および多機能ナノチューブ探針の開発, 2005 年 3 月 8 日 (豊田工業大学).
- (講義等)
- [89] 長谷川修司: 表面・ナノ構造と電気伝導, 総合理学序説「構造と機能」, 2004 年 10 月 6 日, 横浜市立大学.
- [90] 長谷川修司, 松田巖, 山崎詩郎 (TA), 沖野泰之 (TA): 物理学実験 I (3 年生) X 線回折, 2004 年度夏学期 (本郷).
- [91] 長谷川修司: 固体物理学 II (学部 4 年生講義) 2004 年度冬学期 (本郷).
- [92] 長谷川修司: 物理学セミナー (学部 3 年生) 2004 年度冬学期 (本郷).

1 Hasegawa Group

Research Subject: Experimental Surface/Nano Physics

Members: Shuji HASEGAWA and Iwao MATSUDA

Topics in our research group are (1) electronic/mass transports, (2) atomic/electronic structures, (3) phase transitions, (4) electronic excitations, and (5) 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 diffractions, scanning electron microscopy (STM), scanning tunneling micro/spectroscopy, photoemission spectroscopy, and in-situ 4-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-four-point probes. Main results in this year are as follows.

(1) Surface electronic transport: Metal-insulator transitions, hopping conduction, and Hall effect in surface states. Quantitative evaluation of surface-state conductivity from Fermi surface mapping. Conductance of individual Cobalt silicide nanowires and metal-coated carbon nanotube tips.

(2) Surface phases ultra-thin films, and phase transitions: Order-disorder phase transition and charge-density-wave transition on various metal-induced surface superstructures of Si and Ge. Quantum-well state in Ultra-thin Pb film. Ge nanodots layer.

(3) Construction of new apparatuses: Green function STM (low-temperature four-tip STM). A new machine of conductivity measurement by photoemission spectroscopy.

- [1] I. Matsuda, M. Ueno, T. Hirahara, R. Hobara, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Electrical Resistance of a Monatomic Step on a Crystal Surface*, Physical Review Letters **93**, 236801 (2004).
- [2] T. Tanikawa, I. Matsuda, T. Kanagawa, and S. Hasegawa: *Surface-state electrical conductivity at a metal-insulator transition on silicon*, Physical Review Letters **93**, 016801 (2004).
- [3] T. Nagao, J. T. Sadowski, M. Saito, S. Yaginuma, Y. Fujikawa, T. Kogure, T. Ohno, Y. Hasegawa, S. Hasegawa, and T. Sakurai: *Nanofilm Allotrope and Phase Transformation of Ultrathin Bi Film on Si(111)-7 × 7*, Physical Review Letters **93**, 105501 (2004).
- [4] H. Morikawa, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Direct observation of soliton dynamics in charge density waves on a quasi-one-dimensional metallic surface*, Physical Review B **70**, 085412 (2004).
- [5] H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, T. Kanagawa, S. Hasegawa, J. Okabayashi, S. Toyoda, M. Oshima, and K. Ono: *Nonmetallic transport of a quasi-one-dimensional metallic Si(557)-Au surface*, Physical Review B **70**, 113404 (2004) (Subsequently selected in Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology **10**, (2004)).
- [6] C. Liu, S. Yamazaki, R. Hobara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Two-Dimensional Liquid-Solid Phase Transition Observed on Atomic Scale*, Physical Review B **71**, 041310(R) (2005).
- [7] A.A. Saranin, A.V. Zotov, I.A. Kuyanov, V.G. Kotlyar, M. Kishida, Y. Murata, H. Okado, I. Matsuda, H. Morikawa, N. Miyata, S. Hasegawa, M. Katayama, and K. Oura: *Reversible structural transitions at the one-monolayer Tl/Si(100)2 × 1 interface*, Physical Review B **71**, 165307 (2005).
- [8] T. Hirahara, I. Matsuda, M. Ueno and S. Hasegawa: *The effective mass of a free-electron-like surface state of the Si(111)√3 × √3-Ag surface investigated by photoemission and scanning tunneling spectroscopies*, Surface Science **563**, 191-198 (2004).
- [9] C. Liu, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *STM observation at initial stage of Cs adsorption on Si(111)-√3 × √3-Ag surface*, Surface and Interface Analysis **37**, 101-105 (2005).
- [10] R. Hobara, S. Yoshimoto, T. Ikuno, M. Katayama, N. Yamauchi, W. Wongwiriyanpan, S. Honda, I. Matsuda, S. Hasegawa, and K. Oura: *Electronic Transport in Multiwalled Carbon Nanotubes Contacted with Patterned Electrodes*, Japanese Journal of Applied Physics **43**, L1081-L1084 (2004).
- [11] M. Konishi, I. Matsuda, C. Liu, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *A √21 × √21 phase formed by Na adsorption on Si(111)√3 × √3-Ag surface and its electronic structure*, e-J. Surf. Sci. Nanotech. **3**, 107-112 (2005).
- [12] N. Miyata, I. Matsuda, M. D'angelo, H. Morikawa, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *STM observation of the Si(111)-c(12 × 2)-Ag surface*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 151-155 (2005).
- [13] F. Shimokoshi, I. Matsuda, S. Hasegawa, and S. Ino: *Successive Phase Transitions Induced by Ca and Sr Adsorptions on a Si(111) Surface*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 178-185 (2005).

第1章 2004年度に開講された学部講義概要

1.0.1 固体物理 II : 長谷川修司

1. 格子振動と熱的性質

1.1 格子振動；単一原子 1 次元格子の波動、二種原子の 1 次元格子、

1.2 格子振動の量子化

1.3 フォノン分光

1.4 比熱；実験事実、Dulong-Petit の法則、格子比熱、電子比熱、

1.5 熱膨張

1.6 熱伝導

2. 電子輸送現象

2.1 Ohm 則と電気伝導度

2.2 結晶内での電子の運動 (I)-電子波の波束-

2.3 結晶内での電子の運動 (II)-バンド内での電子の運動-

2.4 電子と正孔

2.5 Boltzmann 方程式

2.6 電気伝導度 - Boltzmann 描像 -

2.7 不純物散乱とフォノン散乱

2.8 熱電効果

3. 半導体

3.1 半導体とは

3.2 真性半導体中のキャリア濃度

3.3 半導体のドーピング

3.4 ドープされた半導体中のキャリア濃度

3.5 半導体中の伝導度

3.6 pn 接合とトランジスタ；熱平衡における pn 接合、バイアスされた pn 接合、

3.7 ヘテロ接合と 2 次元電子ガス、量子井戸

4. 超伝導

4.1 超伝導の歴史

4.2 完全導体と完全反磁性（マイスナー効果）

4.3 London 方程式

4.4 その他の実験事実；エネルギー・ギャップ、比熱、同位体効果、

4.5 超伝導の機構 - Fröhlich の理論 -

4.6 Cooper 対の形成

4.7 BCS 理論

4.8 超伝導電流と臨界電流

4.9 BCS 基底状態とマイスナー効果

4.10 磁束の量子化

5. 磁性

5.1 原子・イオンの常磁性・反磁性（気体の磁性）

5.2 自由電子ガスの磁性

5.3 自由電子間の交換相互作用

5.4 強磁性体のバンドモデル

5.5 バンド強磁性体の自発磁化の温度依存性

5.6 局在電子間の強磁性結合