

1.1 長谷川研究室

4月から修士課程1年生として永村直佳と久保敬祐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。8月には日本学術振興会特別研究員 Marie D'angelo がパリ第7大学の助教授としてフランスに帰国した。3月には、宮田伸弘と細村嘉一が修士課程を修了し、宮田は博士課程に進学、細村は企業に就職した。また、劉燦華が博士課程を修了して、物質材料研究機構に博士研究員として転出した。

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。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、それらに固有の電子状態の電子輸送特性を明らかにし、3次元結晶の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

Au/Si(553) 擬一次元鎖構造の電気伝導特性

低次元物質では、電子の閉じ込みによるエネルギーの離散化、状態密度の発散や金属-絶縁体転移などの興味深い物理現象が現れる。階段状の Si(553) 表面上に Au 原子を真空蒸着すると数原子幅の「原子鎖」の列が作成され、表面全体に一樣な擬一次元金属的な構造となる。これは金属-絶縁体転移することが光電子分光 (PES) や走査トンネル顕微鏡 (STM) の研究から報告されている。この表面の電気伝導度の温度依存性を測定した結果、金属-絶縁体転移を観測したが、PES や STM の結果と異なる転移温度を示した。測定方法による解釈の違いのほかに、欠陥が重要な役割をもっていることがわかった。今後は欠陥の量をコントロールすることで、欠陥の影響をより明らかにできると考えている。

表面電気伝導に対する微量吸着原子の影響

金属的で二次元自由電子的な表面電子バンドを持つ Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上に微量な (0.02~0.14 原子層) Au 原子を吸着させると、キャリアがドーピングされて表面電気伝導度が増大する。今年度は、その二次元伝導電子の散乱機構を明らかにするために、温度可変のマイクロ4端子プローブ法を用いて、室温から 120 K までの範囲で伝導度の温度依存性を調べた。Au 原子を吸着させる前の清浄な $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の伝導度は冷却とともに上昇し、フォノン散乱が支配的に効く金属的な伝導であった。これに対し

て、Au 原子吸着した $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の伝導度は冷却とともに減少するという非金属的な振る舞いを示した。これは $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上に散在する Au 原子がキャリアに対して無秩序なポテンシャルを与えた結果だと考えられる。

Bi 量子薄膜の表面状態伝導

Bi バルク結晶は、フェルミ準位にわずかしきキャリアが存在しない半金属であるのに対して、表面状態が非常に強い金属性を示すことが光電子分光測定から明らかになった。そこでマクロ及びマイクロ4端子プローブ法によって、Bi(001) 超薄膜の電気伝導度の膜厚依存性を測定し、表面およびバルク成分の寄与を識別した。その結果、これらの超薄膜の電気伝導度は表面状態が支配的であることが分かった。さらにその伝導度は他の物質系の表面状態電気伝導度に比べて一桁大きい値であったが、ボルツマン方程式を用いて定量的にバンド構造やフェルミ面の大きさから見積もった結果、その値は妥当であることが明らかになった。また温度依存性測定は室温から 10 K まで金属的な振る舞いを示し、従来から言われていた表面状態の電荷密度波転移は起こらないことが示された。

Si(111)-In 表面：金属伝導と金属-絶縁体転移

In が 1 原子層程度吸着した Si(111) 上の種々の表面超構造の電気伝導度の温度依存性を系統的に調べた。光電子分光により半導体的な表面であることがわかっている $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ と $\sqrt{31} \times \sqrt{31}$ 表面の電気伝導度は室温でそれぞれ $2\mu S/$ 、 $20\mu S/$ と低く、その温度依存性は明確に半導体的であった。また、低温で電荷密度波ギャップを形成して金属絶縁体転移する 4×1 表面の電気伝導度は、過去の報告と同様 120 K 前後で金属-絶縁体的な転移を再現し、さらに酸素暴露を行って欠陥を導入したところ抵抗値の上昇を確認した。フェルミ準位で高い電子密度と大きいフェルミ波数をもつ $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ 表面は、10 K の低温でも約 $700\mu S/$ と極めて高い電気伝導度を持ち、その温度依存性は室温から 10 K まで金属的であった。このような低温領域まで金属的な振る舞いが保たれる表面超構造は他に例が無い。定量的にもこれらの電気伝導およびその温度依存性は光電子分光からえられたフェルミ面構造から簡潔に説明できた。そこから $\lambda \sim 1$ 程度の大きい電子格子相互作用を持つことがわかったため、今後さらに低温で表面超構造における超伝導転移の可能性をさぐることを計画している。また、この表面に 100 L 程度の酸素を暴露したり、In の蒸着量を不足させたりすることで意図的に乱れ・欠陥を導入した場合、Mott 可変領域ホッピング伝導型の半導体的な振る舞いに変化することを見出した。今後は、このような外的な要因でもたらされる乱れが $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$ の金属-絶縁体転移にもたら影響を明らかにしていく予定である。[韓国 Inha 大学との共同研究]

Si(111)-Au 表面：乱れとホッピング伝導のタイプ

1 原子層程度以下の Au 原子を Si(111) 表面に吸着させると、吸着量や温度処理の違いによって 5 種類の表面超構造 [5×2 (擬 1 次元的), $\alpha - \sqrt{3} \times \sqrt{3}$ (2 次元金属), $2\sqrt{21} \times 2\sqrt{21}$, $\beta - \sqrt{3} \times \sqrt{3}$ (2 次元ガラス半導体), 6×6 (2 次元結晶半導体)] が得られる。これらの電気伝導度の温度依存性を室温から 10 K まで測定した。同じ Au 吸着量である 6×6 表面と $\beta - \sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面は原子配列の長距離秩序が違い、互いに結晶とガラスの関係にあるが、結晶表面 (6×6) がガラス表面 ($\beta - \sqrt{3} \times \sqrt{3}$) より高い電気伝導度を持つことを明らかにした。また、30 K 以下の温度依存性の解析から前者では ES 型の変領域ホッピング伝導、後者では極度の乱れにより最近接のホッピング伝導になるという質的な違いがあることを明らかにした。

Au 超薄膜の電気伝導：下地表面構造と弱局在

Si(111) 表面に Au 原子を数原子層蒸着すると比較的乱れた Au 膜が形成され、これはしばしば乱れと電気伝導に関する研究対象とされてきた。本研究においては下地の表面超構造を 7×7 と 6×6 -Au に作り分け、Au 蒸着時の温度処理を変えることで、成長した Au 膜の形態の違い、電子状態、およびその電気伝導を STM、内殻光電子分光法、マイクロ 4 端子プローブ法によって系統的に調べた。電気伝導度はすべての膜に共通して温度の対数に比例する弱局在状態の温度依存性を示した。その比例定数は電子の散乱の機構や電子電子相互作用の強さなどによって決まってくるが、電気伝導度を支配する膜の形態にかかわらずなく下地の表面超構造によって決まっていた。弱局在の様相が下地の表面超構造によって影響を受けていることを示唆している。

Si(111)-Au,In 複合系：微量な In 添加の影響

Si(111)-Au 表面超構造の 1 つである $\alpha - \sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au 表面は金属的な表面バンドをもつ。一方で STM による観察からこの表面はドメインウォール (DW) と呼ばれるある幅を持つ位相境界線で 20% 程度の領域が覆われている。この表面の電気伝導度を測定した結果、10 K 付近の低温領域においては数 $\mu S/\square$ という金属としては非常に低い値を示した。一方、近年この表面に微量の In 原子を添加、加熱することで DW が消失し、全体が単一ドメインの $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 領域で覆われた表面に転移することが報告された。この表面の 10 K における電気伝導度は上述の $\alpha - \sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Au 表面の約 100 倍になった。これは微量な In 原子によって表面の電子構造が劇的に変化した可能性のほか、DW の消失やステップ間の電氣的な接続などのナノスケールの電気回路的な接続の変化が考えられるので、光電子分光法や STM を用いてそれらを明らかにする予定である。

Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb 表面の電気伝導

Si(111)- 7×7 表面に $1/3$ 原子層の Pb が吸着すると、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 周期の表面再構成が起こる。この表面の電気伝導の測定を行った。この表面は、単位胞あたりの電子数から金属的であることが予想されるが、その伝導度の温度依存性は半導体的であった。これは光電子分光測定において金属的バンドが存在しないことと符合する。しかし、伝導機構を熱活性型として見積もった活性エネルギーの値は、光電子分光における表面準位のギャップ値とは符合せず、この表面伝導の機構がバンド伝導による機構とは異なることが示唆される。

1.1.2 表面ナノ構造

吸着子誘起の局在状態と表面自由電子の相互作用

二次元自由電子系に引力ポテンシャルを持つ欠陥があると、必ず局在 (束縛) 状態を作る。逆に、この局在状態が二次元自由電子系の分散関係にも影響を及ぼすと予想されるが、実験的にははまだ観察されていない。そこで、二次元自由電子系である Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の上に微量 (~ 0.02 原子層) の一価金属原子 (Au, Ag, Cs) を吸着させ、バンド分散の変化を角度分解光電子分光法で調べた。この表面上の一価金属吸着原子は下地に電子を供与して陽イオンになり、局在状態を作る。室温では、吸着子が拡散しやすく吸着サイトが特定しないため、はっきりしないが、低温になると、吸着子が特定の吸着サイトに固定され、散在した局在状態が共鳴バンドを作る。この共鳴バンドが二次元自由電子的な表面電子バンドを横切るため、表面バンドを上下に分裂させた。これは吸着子の誘起した局在状態と自由電子の混成相互作用の結果である。

表面合金相と Hume-Rothery 型化合物

バルク固溶体の金属合金の中には、Cu-Zn 系で知られているように、電子数と原子数の割合によって結晶構造が決まるものがあり、それらは Hume-Rothery 型化合物 (電子化合物) と呼ばれている。形成にはフェルミ球とブリルアン・ゾーン境界の接触が重要であることが分かっているものの、その安定性は現在でも議論されており、最近では準結晶との密接な関係も指摘されている。様々な表面合金相の中で Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面上の一価金属 (アルカリ金属、貴金属) 吸着系で形成される $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相は、そのフェルミ面とブリルアン・ゾーン境界の位置が近いので表面 (2 次元) 系における Hume-Rothery 型化合物の研究対象として適している。この観点から $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相について内殻光電子分光、光電子フェルミ面マッピング、STM を用いて調べた。Hume-Rothery 則からすれば、2 種類の吸着原子の全吸着量が同じであれば組成比を変えても $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相になるはずであ

るが、実際、いくつかの異なる組成比で $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 相が形成されることを見出した。しかし、それらの STM 像は異なることもわかったが、これらの表面相は酷似した金属的なバンド構造 (フェルミ面) を有していた。このように Hume-Rothery 型合金相の振る舞いが確認できた。さらに自由電子近似に基づいてそのフェルミ面・ゾーン境界効果による系の安定性を計算したところ、フェルミ電子の遮蔽効果も取り入れれば今回の実験結果を説明できることが分かった。[お茶ノ水大学との共同研究]

Bi 量子薄膜の表面状態と量子井戸状態の混成

Si(111) 表面上に Bi 原子を蒸着すると 6 原子層以上で非常に結晶性が良く原子レベルで平坦なエピタキシャル Bi(001) 超薄膜が形成される。本研究では光電子分光法を用いてこの薄膜の電子状態の膜厚依存性を測定した。フェルミ面は膜厚依存性がなく表面状態由来であることが分かった。一方フェルミ準位以下では膜厚が増加するにつれて状態数が増え、明瞭な量子井戸状態が観測された。Bi はスピン軌道相互作用が強い、反転対称性の破れにより Rashba 効果が効いて表面状態バンドのスピン・軌道分裂が理論計算により予言されていたが、量子井戸状態も薄膜の両界面における非対称性からスピン分裂するのではないかと思われた。そこでバンドのスピン特性を調べるために第一原理計算との比較を行ったところ、どうやら Bi と Si との界面での相互作用が非常に弱い、そのようなことは起こらないという結論に至った。しかし表面状態とフェルミ準位近傍の量子井戸状態は混成し、同一バンドの中でスピンの性質が変化していることが示唆され、今後、スピン分解光電子分光を行い、これを確かめる予定である。[物質材料研究機構とスペイン DIPC との共同研究]

Ag 量子薄膜における異方的な量子井戸状態

擬 1 次元金属的な表面超構造である Si(111)- 4×1 -In を 150 K 以下にして、その上に Ag を 3~30 原子層蒸着した後室温までアニールすると、原子レベルで平坦なエピタキシャル Ag 超薄膜が形成される。本研究では、この系の角度分解光電子分光測定を行った。その結果、Ag 薄膜中の量子井戸状態が検出され、さらに面内分散を測定したところ、In 鎖と平行方向には放物線的なバンド分散、In 鎖と垂直方向には分散の無い平らなバンドが見出され、強い異方性を持つ量子井戸状態となっていた。これは下地の 4×1 -In の周期をひきずって成長した積層欠陥を持つ Ag 薄膜自体の異方性を反映したものである。また、下地を等方的な Si(111)- 7×7 にした Ag 薄膜と比較したところ、量子井戸状態のエネルギー準位が低束縛エネルギー側にシフトしていた。下地界面での反射位相シフトが異なることだけでなく、厚み方向の閉じ込めに加えて積層欠陥による面内方向の閉じ込めが加わって擬 1 次元系の量子細線状態になっているこ

とが示唆される。[物質材料研究機構との共同研究]

Pb 量子薄膜の量子井戸状態と電気伝導

Si(111) 表面上に成長した Pb 超薄膜において、超伝導転移温度、ホール係数、電気伝導度などが薄膜の厚さに対して振動するという強い量子サイズ効果が相次いで報告されている。そこで、角度分解光電子分光により、バンド構造およびフェルミ面の測定を行ったところ、過去に当研究室で行われた電気伝導度の厚さに対する振動現象が量子井戸状態と直接関連していることがわかった。薄膜の厚さを増やしていくと、ある厚さにおいて、フェルミ準位を横切る新しい量子井戸状態が形成される。このとき準位間遷移による散乱の寄与が増大し、緩和時間の減少を引き起こす。電気伝導度の“くぼみ”は、この準位間散乱の増大による緩和時間の減少によって引き起こされると解釈された。

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、下地 Si 基板に対してエピタキシャルおよび非エピタキシャルに成長した Ge 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。本研究では、ドット内に形成された量子化最高占有状態のエネルギー位置を光電子分光法により測定した。そのドットサイズ依存性を理論式でフィッティングして得られた実効的な閉じ込めポテンシャル高さは、エピタキシャルドットの方が非エピタキシャルドットより著しく低かった。エピタキシャルドットの下には極薄 Si 酸化膜に直径 1 nm 程度の小孔が存在し、ドットと Si 基板とが「連結」しているが、閉じ込めポテンシャルの低下はこの小孔に起因すると考えられる。一方、ナノドット層の電気伝導度をマイクロ 4 端子プローブ法によって測定し、エピタキシャルドットが非エピタキシャルドットに比べて著しく高いことがわかった。これは、上述の小孔がキャリア輸送効率に大きく寄与していることを示しているが、その詳細は不明なので、今後、電気伝導度の温度依存性やプローブ間隔依存性を測定して伝導メカニズムの解明を目指す。[東京大学物理工学教室との共同研究]

探針接触法と表面エレクトロマイグレーション

超高真空走査電子顕微鏡 (SEM) の中で Au 探針を高温の Si(111) 基板表面に直接接触させて Au 原子を基板上に移動させると、接触点近傍に 3 次元的な島 (アイランド) が形成される。このアイランドは、基板に流す直流電流によって常に電流方向と反対に移動する (表面エレクトロマイグレーション)。また、基板シリコンと反応して基板を削って溝を形成しながら移動した。アイランドの移動速度からその活性化エネルギーを求めた。また、ステップに沿

移動速度がテラス上に比べて約 20 倍ほど速かった。これらの観察に基づき、それぞれのアイランドのエレクトロマイグレーションのメカニズムを考察中である。

1.1.3 新しい装置・手法の開発

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独立駆動型 4 探針 STM 装置を数年かけて開発している。これは独立駆動型室温 4 探針 STM と温度可変マイクロ 4 端子プローブ法を包含する測定手法となる。また、この装置では遅延グリーン関数の実空間マッピングも可能となる。グリーン関数は輸送現象の本質的な特性を表しているが、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刺激に対する応答を他の探針で検出する必要があり、10 pA オーダーの高精度なトンネル電流検出機構、液体 He 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。今年度は内部除震機構を追加し、2~4 探針での同時トンネルコンタクトの維持を達成し、探針間の干渉が少なく、実用に耐えうることを実証した。また、冷却機構の改善をおこない、低温を十分長時間維持できると低温での試料作成を実現した。来年度は、室温から液体 He 温度までの温度範囲での各種表面の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。

金属被覆カーボンナノチューブ STM 探針の開発

当研究室では多探針 STM の探針間隔を電子の平均自由行程程度まで近づけるという目的で金属被覆カーボンナノチューブ (CNT) 探針を開発してきた。昨年度は PtIr 被覆 CNT 探針が非常に高い導電性を持つことを示した。今年度は大気中で電気泳動法を用いて CNT を接合することで生産性を向上させ、SEM の電子線照射でアモルファスカーボンを CNT/W 探針接合部付近に成長させることで高い強度を実現し、より実用性の高い探針作成のレシピを確立した。また、これらの CNT 探針を実際に用いて、PtIr 被覆 CNT やコバルトシリサイドナノワイヤの 4 探針電気伝導測定に成功した。この測定での最小探針間隔は約 150 nm であり、W 探針の場合に比べて約 1 桁小さくすることができた。今後、最小探針間隔をさらに縮め、電気伝導の研究やグリーン関数マッピングに応用していく。[大阪大学工学部での共同研究]

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 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)

<受賞>

- [1] 守川春雲、松田巖、長谷川修司: 日本表面科学会第 17 回論文賞 (2005 年度), 「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」(2005 年 11 月).
- [2] I. Matsuda: ISSS-4 Best Poster Award, *Transport Phenomena of a Two-Dimensional Metallic Monolayer Studied By Photoemission and Conductivity Measurements*, at International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, 2005 年 11 月 13-17 日 (大宮).
- [3] H. Okino: ISSS-4 Travel Award, *Resistance measurements of cobalt silicide nanowires epitaxially grown on Si(110)*, at International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, 2005 年 11 月 13-17 日 (大宮).

<報文>

(原著論文)

- [4] C. Liu, I. Matsuda, R. Hobara, and S. Hasegawa: *Interaction between adatom-induced localized states and a quasi-two-dimensional electron gas*, *Physical Review Letters* **96**, 036803 (Jan 2006).
- [5] A. Konchenko, I. Matsuda, S. Hasegawa, Y. Nakamura, and M. Ichikawa: *Observation of Quantum Confinement in Ge nanodots on an oxidized Si surface*, *Physical Review B* **73**, 113311 (Mar 2006).
- [6] 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* **71**, 235315 (Jun 2005).
- [7] T. Hirahara, I. Matsuda, C. Liu, R. Hobara, S. Yoshimoto, and Shuji Hasegawa: *Direct measurement of the Hall effect in a free-electron-like surface state*, *Physical Review B*, in press (2006).
- [8] 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*, **86**, 233108 (Jun 2005).
- [9] I. Matsuda, T. Hirahara, M. Ueno, R. Hobaram and S. Hasegawa: *Electrical Conduction through a Monatomic Step*, *Journal de Physique IV* **132**, 57 (Apr 2006).

- [10] 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 **590**, 162-172 (Oct 2005).
- [11] T. Nagao, S. Yaginuma, M. Saito, T. Kogure, T. Ohno, S. Hasegawa, and T. Sakurai: *Strong Lateral Growth and Crystallization via Two-dimensional Allotropic Transformation of Semi-metal Bi Film*, Surface Science **590**, L247-252 (Sep 2005).
- [12] H. Konishi, S. Honda, M. Kishida, Y. Murata, T. Yasuda, D. Maeda, K. Tomita, K. Motoyoshi, S. Yoshimoto, R. Hobara, I. Matsuda, J.-G. Lee, H. Mori, K. Oura, S. Hasegawa, and M. Katayama: *Synthesis of Metal-Alloy Nanowires toward Functional Scanning Probe Microscope*, Japanese Journal of Applied Physics **45**, 3690-3692 (Apr 2006).
- [13] 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 **44**, 5336-5338 (Jul 2005).
- [14] S. Yoshimoto, Y. Murata, R. Hobara, I. Matsuda, M. Kishida, H. Konishi, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, S. Honda, H. Okado, K. Oura, M. Katayama, and S. Hasegawa: *Electrical Characterization of Metal-Coated Carbon-Nanotube Tips*, Japanese Journal of Applied Physics **44**, L1563-L1566 (Dec 2005).
- [15] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, Y. Hosomura, S. Hasegawa, and P. A. Bennett: *Resistance measurements of metallic silicide nanowires on a Si substrate with a four-tip scanning tunneling microscope*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 362 (Nov 2005).
- [16] M. Kishida, H. Konishi, Y. Murata, D. Maeda, T. Yasuda, T. Ikuno, S. Honda, M. Katayama, S. Yoshimoto, R. Hobara, I. Matsuda, and S. Hasegawa: *Coating Carbon Nanotubes with Compound Ultrathin Film: A Novel Route to Functional SPM tips*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 417-420 (Dec 2005).
- [17] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa and S. Hasegawa: *Electrical Conduction on Various Au/Si(111) Surface Superstructures*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 497 (Dec 2005)
- (国内雑誌)
- [18] 松田巖、上野将司、平原徹、保原麗、守川春雲、劉燦華、長谷川修司: 結晶表面上単原子ステップの電気抵抗, 表面科学 **27**, 182-187 (Mar 2006).
- [19] 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 **26**, 468-473 (Jul 2005).
- [20] 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 **26**, 344-350 (Jun 2005).
- (著書)
- [21] 長谷川修司 (分担執筆): SPM ロードマップ 2005 (森田清三編集、丸善 Dec 2005) .
- (学位論文)
- [22] Canhua Liu: Structures and Electronic Transport of Two-Dimensional Phases on Ag-terminated Si Surface (博士論文).
- [23] 宮田伸弘: 半導体表面上の鉛の表面超構造および量子薄膜のフェルミ面と電子構造 (修士論文) .
- [24] 細村嘉一: In 吸着表面超構造の電気伝導の研究 (修士論文) .
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 招待講演
- [25] I. Matsuda: *Fermiology of two-dimensional metal layers on the semiconductor surface*, The 10th Hiroshima International Symposium on Synchrotron Radiation, 2006 年 3 月 16 日 (広島).
- [26] S. Hasegawa: *Electronic Transport at Nanostructures on Silicon Surfaces*, Asian Workshop on Surface Nano-Science, 2006 年 2 月 9 日 (Pheonix park, 韓国).
- [27] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon*, The 3rd International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT2005)/The 3rd Vacuum and Surface Sciences Conference of Asia and Australia (VASSCAA-3), 2005 年 7 月 4 日 (Singapore).
- [28] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon*, 13th International Congress on Thin Films/8th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ICTF-13/ACSIN-8), 2005 年 6 月 20 日 (Stockholm, Sweden).
- [29] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon Measured by Four-Tip STM*, The 4th International Workshop on Surfaces and Workshop on Water-Surface Interactions, 2005 年 5 月 30 日 (北京, 中国).
- 一般講演
- [30] I. Matsuda: *In situ resistance measurements of atomic and nanometer wires on solid surfaces*, NSFC-JSPS A3 Foresight Program Seminar on Sub-10 nm Wires; new physics and chemistry: The First A3 Workshop, 2005 年 12 月 13 日 (北京, 中国).

- [31] S. Hasegawa: *Topics and Facilities in Hasegawa(S) Group of University of Tokyo*, NSFC-JSPS A3 Foresight Program Seminar on Sub-10 nm Wires; new physics and chemistry: The First A3 Workshop, 2005 年 12 月 13 日 (北京, 中国).
- [32] S. Hasegawa: *Adatoms on a Free-Electron-Like Surface State of Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag*, Symposium on Surface Physics (SSP06), 2006 年 1 月 12 日 (栗石).
- **The 13th International Congress on Thin Films/8th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ICTF 13/ACSIN 8)**, 2005 年 6 月 19-23 日 (Stockholm, Sweden)
- [33] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa, and S. Hasegawa: *Surface electronic transport study of glass-crystal transition on Au/Si(111) surface from room temperature to ultra-low temperature*.
- [34] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobarra, Y. Hosomura, S. Hasegawa, Z. He and P.A. Bennett: *Transport properties of epitaxial cobalt silicide nanowires on Si(110)*.
- [35] C. Liu, I. Matsuda, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Influence of adatoms on the two-dimensional electron gas in the surface of Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*.
- **The 13th International Conference on Scanning Tunneling Microscopy/Spectroscopy and Related Techniques (STM'05)**
2005 年 7 月 3-7 日 (札幌)
- [36] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobarra, Y. Hosomura, S. Hasegawa, Z. He and P.A. Bennett: *Resistance measurements of epitaxial cobalt silicide nanowires on Si(110)*.
- [37] S. Yoshimoto, R. Hobarra, I. Matsuda, Y. Murata, M. Kishida, H. Konishi, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, S. Honda, H. Okado, M. Katayama, K. Oura, and S. Hasegawa: *Electrical Characterization of Metal-Coated Carbon Nanotube Tip*.
- [38] C. Liu, I. Matsuda, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Influence of adatoms on the two-dimensional electron gas in the surface of Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*.
- [39] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa and S. Hasegawa: *Study of Surface Electric Conduction at Glass-Crystal Transition in Au/Si(111) Surface Superstructures: Variable Range Hopping at Glass Phase*.
- [40] Y. Murata, M. Kishida, H. Konishi, D. Maeda, T. Yasuda, K. Motoyosi, K. Tomita, S. Honda, H. Okado, S. Yoshimoto, R. Hobarra, I. Matsuda, S. Hasegawa, K. Oura and M. Katayama: *Metal-coated Carbon Nanotube Tips for Multi-Probe STM*.
- [41] H. Konishi, M. Kishida, Y. Murata, T. Yasuda, D. Maeda, K. Tomita, K. Motoyoshi, S. Honda, J.-G. Lee, H. Mori, S. Yoshimoto, R. Hobarra, I. Matsuda, S. Hasegawa, K. Oura, and M. Katayama: *Coating Carbon Nanotubes with Inorganic Compounds toward Functionalized Nanoprobe Applications*.
- **The 10th International Conference on the Formation of Semiconductor Interfaces(ICFSI-10)**, 2005 年 7 月 4-7 日 (Aix-en-Provence, France)
- [42] T. Hirahara, I. Matsuda, R. Hobarra, S. Yoshimoto, S. Hasegawa: *Hall Effect and Electrical Conductivity of Free-Electron Like Surface States of Ag/Si(111)*.
- [43] I. Matsuda, T. Hirahara, C. Liu, R. Hobarra, M. Ueno, and S. Hasegawa: *Transport Phenomena of a Two-Dimensional Metallic Monolayer on a Semiconductor Surface*.
- [44] N. Miyata, I. Matsuda, H. Morikawa, T. Hirahara, M. D'angelo, and S. Hasegawa: *STM observation of Si(111)c(12×2)-Ag surface at low temperature*.
- **The 13th General Meeting of the European Physical Society (EPS-13): Beyond Einstein - Physics for the 21st Century**
2005 年 7 月 12-15 日 (Bern 大学, Switzerland)
- [45] I. Matsuda, T. Hirahara, C. Liu, R. Hobarra, M. Ueno, and S. Hasegawa: *Transport Phenomena of a Two-Dimensional Metallic Monolayer on a Semiconductor Surface*.
- [46] N. Miyata, I. Matsuda, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Photoemission and electronic transport study of the quantum well states in Pb film on Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb surface*.
- [47] T. Hirahara, I. Matsuda, M. Ueno, S. Hasegawa, *Fermi surface mapping of two-dimensional metallic surface states on Si(111)*.
- [48] I. Matsuda, T. Hirahara, C. Liu, M. D 'angelo, and S. Hasegawa: *Fermi Surface Evolution Upon Monovalent Atom Adsorption on a Surface Superstructure*.
- **International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-4)**
2005 年 11 月 13-17 日 (大宮)
- [49] N. Nagamura, I. Matsuda, T. Uchihashi, T. Hirahara, N. Miyata, C. Ohbuchi, and S. Hasegawa: *Quantum well states of ultra-thin Ag films prepared on one dimensional atomic array*.
- [50] R. Hobarra, S. Yoshimoto, I. Matsuda, S. Hasegawa: *Development of Low Temperature Four-Tip STM*.

- [51] Y. Nakayama, A. Konchenko, I. Matsuda, S. Hasegawa, Y. Nakamura, and M. Ichikawa, *Direct Observation of Quantum Confinement Effect in Ge Nanodots on oxidized Si surface*.
- [52] I. Matsuda, C. Liu, T. Hirahara, T. Tanikawa, M. Ueno and S. Hasegawa, *Transport Phenomena of a Two-Dimensional Metallic Monolayer Studied by Photoemission and Conductivity Measurements* [Best Poster Award].
- [53] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, Y. Hosomura, S. Hasegawa, Z. He and P.A. Bennett: *Resistance measurements of cobalt silicide nanowires epitaxially grown on Si(110)* [Travel Award].
- [54] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, Yu. M. Koroteev, E. V. Chulkov, P. M. Echenique, M. Saito, S. Hasegawa, *An ARPES Study on Quantum-well states of Ultrathin Bi films on Si(111)*.
- [55] N. Miyata, I. Matsuda, H. Morikawa, T. Hirahara, M. D'angelo and S. Hasegawa: *STM observation of Si(111)c(12×2)-Ag surface*.
- [56] S. Yoshimoto, K. Kubo, H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, Y. Murata, M. Kishida, H. Konishi, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, S. Honda, H. Okado, M. Katayama, K. Oura, and S. Hasegawa: *Electrical Characterization of Metal-Coated Carbon Nanotube Tip*.
- [57] T. Hirahara, I. Matsuda, R. Hobara, S. Yoshimoto, S. Hasegawa: *Surface Conductivity and Hall Effect of Free-Electron Like Surface States of Ag/Si(111)*.
- [58] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa and S. Hasegawa: *Surface Electrical Conductivity in Au/Si(111) Surface Superstructures and Thin Films*.
- [59] C. Liu, I. Matsuda, T. Hirahara, and S. Hasegawa: *Interaction between the adatom-induced localized state and the free-electron-like surface state*.
- **JSPS-NSFC-KOSEF A3 Foresight Program on sub-10 nm wires; new physics and chemistry: 1st Project Seminar**
2006年2月7日-3月1日(千葉).
- [60] S. Yoshimoto, K. Kubo, H. Okino, R. Hobara, I. Matsuda, Y. Murata, M. Kishida, H. Konishi, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, S. Honda, H. Okado, M. Katayama, K. Oura, and S. Hasegawa: *Four-Terminal Conductivity Measurement Using PtIr-Coated Carbon Nanotube Tips*.
- [61] T. Hirahara, T. Nagao, I. Matsuda, G. Bihlmayer, Yu. M. Koroteev, E. V. Chulkov, P. M. Echenique, M. Saito, S. Hasegawa, *Role of Spin-Orbit Coupling and Hybridization Effects in the Electronic Structure of Ultrathin Bi Films*.
- [62] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa and S. Hasegawa: *Electrical Conduction in Au/Si(111) Surface Superstructures: Suppression of Variable Range Hopping in Extremely Disordered Glass Surface*.
- [63] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobara, Y. Hosomura, S. Hasegawa, Z. He, and P. A. Bennett: *Resistance measurements of silicide nanowires epitaxially grown on Si(110)*.
- [64] Y. Nakayama, I. Matsuda, S. Hasegawa, and M. Ichikawa, *Electronic structure and electric conductivity of Ge nanodots with controlled confining potential barrier*.
- (国内会議)
- 招待講演
- [65] 松田巖: *Fermiology of Hall and Electrical Conduction through a Two-Dimensional Metallic Monolayer*, 第39回放射光セミナー、2005年7月21日(東京大学、柏).
- [66] 長谷川修司: 4探針型走査トンネル顕微鏡の開発と表面・ナノ電子輸送の研究, 日本電子顕微鏡学会(瀬藤賞受賞講演) 2005年6月2日(筑波).
- [67] 長谷川修司: 4探針STMによる表面・ナノ構造の電気特性の計測, 第8回キヤノン基盤技術フォーラム, 2005年7月15日(新丸子).
- [68] 長谷川修司: 多探針STMによるナノ計測-ナノスケール電気伝導からグリーン関数マッピングまで-, JSTナノ計測ワークショップ, 2005年8月11日(静岡).
- [69] 長谷川修司: ナノ電気伝導計測用導電性プローブ, 日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第167委員会第40回研究会, 2005年10月19日(大阪大学).
- 一般講演
- [70] 長谷川修司, 山崎詩郎, 松田巖, 沖野浩之, 守川春雲: 表面構造のガラス結晶化転移での電気伝導, 平成17年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「ナノ半導体物理の構築とその作製・計測技術の開拓」, 2005年10月14日(岩沼, 宮城).
- [71] 沖野泰之, 松田巖, 保原麗, 吉本慎也, Z. He, P. A. Bennett, 長谷川修司: 自己組織化によって作製されたナノワイヤの電気特性, 第1回21世紀COE QUESTS RA 若手交流シンポジウム, 2005年11月(東京大学).
- [72] 坂本克好, 名取晃子, 河野勝泰, 長谷川修司: Si(111)微斜面におけるAuアイランドのエレクトロマイグレーション, 第53回応用物理学関係連合講演会, 2006年3月22日(武蔵工業大学).
- 日本物理学会 2005 秋季大会
2005年9月19-22日(同志社大学).
- [73] C. Liu, 松田巖, 平原徹, 長谷川修司: *ARPES evidence of surface-state localization at atoms on the Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*.
- [74] C. Liu, 松田巖, 長谷川修司: *Influence of local band bending on the shapes of Si2p core-level spectra of the Au adsorbed Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface*.

- [75] 永村直佳, 松田巖, 内橋隆, 大淵千種, 箕輪雅章, 宮田伸弘, 平原徹, 長谷川修司: Si(111)8 × 2-In 上 Ag 薄膜の量子井戸状態の研究.
- [76] 松田巖, A. Konchenko, 中村芳明, 中山泰生, 長谷川修司, 市川昌和: 酸化 Si 表面上 Ge ナノドットの量子サイズ効果の直接観測.
- [77] 山崎詩郎, 松田巖, 沖野泰之, 守川春雲, 長谷川修司: Au 吸着 Si(111) 表面の STM 観察と電気伝導.
- [78] 保原麗, 吉本真也, 松田巖, 長谷川修司: 低温型四探針 STM 装置の開発と電気伝導測定.
- [79] 平原徹, 長尾忠昭, 松田巖, G. Bihlmayer, Yu. M. Koroteev, E. V. Chulkov, P. M. Echenique, 齋藤峯雄, 長谷川修司: Si(111) 表面上 Bi(001) 超薄膜の光電子分光測定.
- [80] 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 II.
- [81] 長谷川修司, 加賀山朋子, 滝川洋二: 物理チャレンジ 2005 報告 実験問題 .
- 日本表面科学会 第 25 回表面科学講演大会
2005 年 11 月 17-19 日 (大宮).
- [82] 永村直佳, 松田巖, 内橋隆, 箕輪雅章, 宮田伸弘, 平原徹, 大淵千種, 長谷川修司: Si(111)4×1-In および 7x7 上 Ag 薄膜の量子井戸状態の研究.
- [83] 宮田伸弘, 松田巖, 守川春雲, 平原徹, M. D'angelo, 長谷川修司: Si(111)-c(12×2)-Ag 表面の STM 観察.
- [84] 劉燦華, 松田巖, 長谷川修司: 内核準位光電子分光法による金原子吸着した Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面の研究.
- [85] 保原麗, 吉本真也, 松田巖, 長谷川修司: 低温型四探針 STM 装置の開発と電気伝導測定.
- [86] 山崎詩郎, 松田巖, 沖野泰之, 守川春雲, 長谷川修司: Au 薄膜に対する乱れの STM 観察および弱局在の電気伝導測定.
- [87] 松田巖, 平原徹, 劉燦華, 永村直佳, 宮田伸弘, 長谷川修司: 固体表面上 2 次元自由電子的金属単原子層のフェルミオロジー.
- [88] 平原徹, 松田巖, 保原麗, 吉本真也, 長谷川修司: 自由電子的な表面状態のホール効果測定.
- [89] 中山泰生, A. Konchenko, 松田巖, 長谷川修司, 中村芳明, 市川昌和: 極薄 Si 酸化膜上の Ge ナノドットの電子状態.
- 日本物理学会第 61 回年次大会
2006 年 3 月 27-30 日 (愛知大学・松山大学).
- [90] C. Liu, 松田巖, 吉本真也, 長谷川修司: Surface electronic transport of Au adsorbed Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag surface.
- [91] 永村直佳, 松田巖, 内橋隆, 宮田伸弘, 平原徹, 長谷川修司: Si(111)4 × 1-In 表面上擬 1 次元 Ag 薄膜の量子サイズ効果に関する研究 II, .
- [92] 松田巖, 永村直佳, 山崎詩郎, 平原徹, C.Liu, 宮田伸弘, W.H.Choi, 小林功佳, H.W.Yeom, 長谷川修司: 半導体表面上 2 次元貴金属合金相のフェルミ面.
- [93] 中山泰生, 松田巖, 長谷川修司, 市川昌和: 極薄 Si 酸化膜上 Ge ナノドットの閉じ込めポテンシャルと電気伝導特性.
- [94] 山崎詩郎, 松田巖, 沖野泰之, 守川春雲, 長谷川修司: 全 Au/Si(111) 表面超構造シリーズの電気伝導とその違い.
- [95] 沖野泰之, 松田巖, 山崎詩郎, 保原麗, 長谷川修司: Au/Si(553) 表面の電気伝導度の温度依存性.
- [96] 長谷川修司, 鈴木亨, 毛塚博史, 江尻宥郷, 大山光晴, 杉山忠男, 田中忠芳, 北原和夫, 並木雅俊: 若者にチャレンジの機会を IV: 国際物理オリンピック 2006(シンガポール大会) に向けて.
- (セミナー)
- [97] 長谷川修司: ナノテクノロジーと物理学, 栃木県立宇都宮高等学校 SSH 特別講義, 2005 年 5 月 17 日 (宇都宮).
- [98] S. Hasegawa: *Electrical Conduction through Atomic/Nano Wires on Silicon Measured by Four-Tip STM*, Institute of Automation and Process Control, Russian Academy of Science, 2005 年 7 月 24 日 (Vladivostock, Russia) .
- [99] 長谷川修司: ナノスケールの世界と電子, 日本表面科学会 平成 17 年度市民講座 「ナノスケールの世界を覗いてみませんか」, 2005 年 8 月 6 日 (東京大学) .
- [100] 長谷川修司: 1 原子層, 1 原子列の電気伝導を測る, 九州大学理学府凝縮系科学専攻 物理教室談話会 2005 年 11 月 29 日 (九州大学).
- (講義等)
- [101] 長谷川修司: ナノサイエンスと表面物理学と電気伝導, 九州大学理学府凝縮系科学専攻 物理コース, 集中講義 2005 年冬学期 11 月 28-30 日.
- [102] 長谷川修司: 原子をみる、電子をみる、表面をみる -ナノワールドへの挑戦-, 成蹊大学 国際教養科目「現代を生きる -最先端科学の挑戦~医療からナノまで-」, 2005 年 11 月 25 日, 12 月 2 日, 12 月 9 日.
- [103] 長谷川修司, 松田巖, 吉本真也 (TA): 物理学実験 I (3 年生) 電子回折, 2005 年度冬学期 (本郷) .
- [104] 長谷川修司: 固体物理学 II (学部 4 年生講義) 2005 年度冬学期 (本郷) .
- [105] 長谷川修司: 物理学ゼミナール (学部 3 年生) 2005 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, scanning tunneling micro/spectroscopy (STM/S), photoemission spectroscopy, and *in-situ* 4-point-probe conductivity measurements with four-tip STM and monolithic micro-4-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, Bi, and Ag films. Ge nanodots layer.

(3) Construction of new apparatuses: Green's-function STM (low-temperature four-tip STM). Metal-coated carbon nanotube STM tips.

- [1] C. Liu, I. Matsuda, R. Hobar, and S. Hasegawa: *Interaction between adatom-induced localized states and a quasi-two-dimensional electron gas*, Physical Review Letters **96**, 036803 (Jan 2006).
- [2] A. Konchenko, I. Matsuda, S. Hasegawa, Y. Nakamura, and M. Ichikawa: *Observation of Quantum Confinement in Ge nanodots on an oxidized Si surface*, Physical Review B **73**, 113311(Mar 2006).
- [3] 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 **71**, 235315 (Jun 2005).
- [4] T. Hirahara, I. Matsuda, C. Liu, R. Hobar, S. Yoshimoto, and ShujiHasegawa: *Direct measurement of the Hall effect in a free-electron-like surface state*, Physical Review B, in press (2006).
- [5] H. Okino, I. Matsuda, R. Hobar, Y. Hosomura, S. Hasegawa, and P. A. Bennett: *In situ resistance measurements of epitaxial cobalt silicide nanowires on Si(110)*, Applied Physics Letters, **86**, 233108 (Jun 2005).
- [6] I. Matsuda, T. Hirahara, M. Ueno, R. Hobar and S. Hasegawa: *Electrical Conduction through a Monatomic Step*, Journal de Physique IV **132**, 57 (Apr 2006).
- [7] 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 **590**, 162-172 (Oct 2005).
- [8] T. Nagao, S. Yaginuma, M. Saito, T. Kogure, T. Ohno, S. Hasegawa, and T. Sakurai: *Strong Lateral Growth and Crystallization via Two-dimensional Allotropic Transformation of Semi-metal Bi Film*, Surface Science **590**, L247-252 (Sep 2005).
- [9] H. Konishi, S. Honda, M. Kishida, Y. Murata, T. Yasuda, D. Maeda, K. Tomita, K. Motoyoshi, S. Yoshimoto, R. Hobar, I. Matsuda, J.-G. Lee, H. Mori, K. Oura, S. Hasegawa, and M. Katayama: *Synthesis of Metal-Alloy Nanowires toward Functional Scanning Probe Microscope*, Japanese Journal of Applied Physics **45**, 3690-3692 (Apr 2006).
- [10] Y. Murata, S. Yoshimoto, M. Kishida, D. Maeda, T. Yasuda, T. Ikuno, S. Honda, H. Okado, R. Hobar, 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 **44**, 5336-5338 (Jul 2005).
- [11] S. Yoshimoto, Y. Murata, R. Hobar, I. Matsuda, M. Kishida, H. Konishi, T. Ikuno, D. Maeda, T. Yasuda, S. Honda, H. Okado, K. Oura, M. Katayama, and S. Hasegawa: *Electrical Characterization of Metal-Coated Carbon-Nanotube Tips*, Japanese Journal of Applied Physics **44**, L1563-L1566 (Dec 2005).
- [12] S. Yamazaki, I. Matsuda, H. Okino, H. Morikawa and S. Hasegawa: *Electrical Conduction on Various Au/Si(111) Surface Superstructures*, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3**, 497 (Dec 2005)

第I部

2005年度 物理学教室全般に関する報告

第1章 2005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 | 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、 |
| 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、 | 3.7 ヘテロ接合と 2 次元電子ガス、量子井戸 |
| 1.2 格子振動の量子化 | 4. 超伝導 |
| 1.3 フォノン分光 | 4.1 超伝導の歴史 |
| 1.4 比熱; 実験事実、Dulong-Petit の法則、格子比熱、電子比熱、 | 4.2 完全導体と完全反磁性 (マイスナー効果) |
| 2. 電子輸送現象 | 4.3 London 方程式 |
| 2.1 Ohm 則と電気伝導度 | 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、 |
| 2.2 結晶内での電子の運動 (I)-電子波の波束- | 4.5 超伝導の機構 - Fröhlich の理論 - |
| 2.3 結晶内での電子の運動 (II)-バンド内での電子の運動- | 4.6 Cooper 対の形成 |
| 2.4 電子と正孔 | 4.7 BCS 理論 |
| 2.5 Boltzmann 方程式 | 4.8 超伝導電流と臨界電流 |
| 2.6 電気伝導度 - Boltzmann 描像 - | 4.9 BCS 基底状態とマイスナー効果 |
| 2.7 不純物散乱とフォノン散乱 | 4.10 磁束の量子化 |
| 2.8 熱電効果 | 5. 磁性 |
| 3. 半導体 | 5.1 原子・イオンの常磁性・反磁性 (気体の磁性) |
| 3.1 半導体とは | 5.2 自由電子ガスの磁性 |
| 3.2 真性半導体中のキャリア濃度 | 5.3 自由電子間の交換相互作用 |
| 3.3 半導体のドーピング | 5.4 強磁性体のバンドモデル |
| 3.4 ドープされた半導体中のキャリア濃度 | 5.5 バンド強磁性体の自発磁化の温度依存性 |
| 3.5 半導体中の伝導度 | 5.6 局在電子間の強磁性結合 |

1.0.2 物性物理学特論 (大学院「表面物理学」共通): 常行真司、小森文夫、長谷川修司

- | | |
|--------------------------|------------------|
| 1. 概論 「表面」であることの意味 | 5.5 表面電子定在波 |
| 2. 表面電子状態 | 6. 表面超構造と原子配列の解析 |
| 3. 密度汎関数理論 | 6.1 表面超構造と相転移 |
| 4. 第一原理分子動力学法と表面構造研究への応用 | 6.2 回折法 |
| 5. 走査プローブ顕微鏡 | 6.3 顕微鏡法 |
| 5.1 走査トンネル顕微鏡の原理 | 6.4 動的過程 |
| 5.2 表面原子構造観察 | 7. 表面電子状態の解析 |
| 5.3 局所電子状態測定 | 7.1 表面電子状態 |
| 5.4 表面バンドの観測 | 7.2 (逆) 光電子分光法 |

- 7.3 トンネル分光法
- 7.4 光電子分光によるバンド分散・原子結合状態測定
- 7.5 時間分解測定
- 8. 表面電子輸送
 - 8.1 表面空間電荷層の2次元電子系
 - 8.2 表面電子バンドの2、1次元電子系
 - 8.3 原子マニピュレーション
- 9. 表面超薄膜磁性
 - 9.1 磁気モーメントと相転移
 - 9.2 強磁性超薄膜
 - 9.3 表面ナノ強磁性体