

論文の内容の要旨

論文題名 半導体表面上に形成される低次元金属系のフェルミ面と相転移

Fermi Surfaces and Phase Transitions of Low-Dimensional Metallic System on Semiconductor Surfaces

氏名 守川 春雲

1次元、2次元の低次元系は、3次元固体に比べて電子電子相互作用、電子格子相互作用が大きく働く。これらの効果は、朝永ラッティンジャー液体、アンダーソン局在、コーン異常のように、時として極端な形で出現し、3次元固体では見られない独特の物性を提供する。その中でも理論・実験の両側面から最も広範に研究されているのがパイエルス転移である。

従来、これら低次元物理系の研究は強い異方性を持つ擬低次元3次元固体を用いたものが主流であった。ところが、近年、表面という本質的な低次元系においても、低次元相転移現象が報告されはじめた。表面は層状物質などの擬低次元3次元固体とは異なり、1つの独立した層である。特に半導体の表面の場合、表面の下に広がる3次元固体部分(バルク)はバンドギャップを持つため、表面状態電子とバルク状態電子の相互作用は極めて少ない。そのため、表面を用いることにより純粋な2次元系の物理を知ることができる。また、表面上に様々な原子を吸着させることによって擬1次元的な表面を作ることにもできる。実験的にも(1)固体の電子状態を探る光電子分光は本質的に表面敏感である(2)実空間を原子レベルで観測する手法である走査プローブ顕微鏡は表面の情報のみを与えるものである、の2点の理由から擬低次元3次元固体より厳密な議論が可能となる。さらに、従来表面系においては困難とされた電子輸送測定に関しても、当研究室において開発された μ -4端子法によって可能となっている。従って、上記のような表面における低次元相転移現象は大きな注目を集めている。

本研究の目的は、このような性質を持つ表面という低次元系を用いた低次元物理現象の直接的な探求である。

系としては擬1次元金属系として知られるSi(111)- 4×1 -In表面、2次元金属系として知られるGe or Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb or Sn表面を扱った。これらの系は、低温領域において特異な相転移現象を起こすことで知られており、それぞれの低温相である $8 \times 2'$ 相、 3×3 相はパイエルス転移に伴う電荷密度波(CDW)相の候補ではあるが、正確な要因は決定されていなかった。

そこで本研究では、まず、(1)これらの系の相転移の要因を決定すること(2)低次元系に固有のダイナミカルな諸現象を実際に観測することの2点を目指した。以下にその主な内容を述べる。

ステッピングモーター、光電子アナライザーを用いた自動フェルミ面マッピング装置の開発 低次元金属系の相転移を決定する最大の要因は、系のフェルミ面の形状である。そこで本研究では、ステッピングモーター、PCIカウンターボード等を利用した自動フェルミ面マッピング装置を作成した。そしてその性能は金属/半導体表面のプロトタイプとして知られるGe(111)表面上AgまたはAu蒸着 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面を用いて確認された。そしてこれらの系は自由電子的なフェルミ面を持つことを見いだした。

Si(111)-4 × 1-In 表面の 8 × 2' 相転移 Si(111) 表面上に 1 原子層の In を蒸着、加熱再構成させると擬 1 次元金属表面である 4 × 1 系が作られる。この系は 3 つの 1 次元的な金属バンドを持ち、そのうち 2 つのフェルミ面は、×2 周期に対応するよい nesting 条件を満たすことが知られている。

本研究ではまず、高分解能角度分解光電子分光により室温及び低温における詳細なバンドマッピングを行った。その結果、低温において、nesting に寄与する金属バンドが明確に fold back することがわかった。すなわち、この系の 8 × 2' 相転移は、金属絶縁体転移であり、8 × 2' 相は CDW 相であることが支持された。

次に、この 8 × 2' CDW 系の詳細を実空間で観測するため、6K における走査トンネル顕微鏡 (STM) 観察を行った。その結果、この系では、占有状態像と非占有状態像の対応が場所によって異なり、2 通りに分類されることがわかった。この事実は、格子配置が電子分布を決定するという通常の表面では起こりえないことであり、まさしく 8 × 2' 相が CDW 相であることを意味する。×2 周期を持つ CDW 相では格子と電荷の locking の効果が大きく、格子の観測された占有・非占有状態像の 2 通りの対応は格子と電荷が 2 通りに locking されるモデルで説明された。

さらに STM 観察から、一つの鎖の中で互いに逆位相の CDW の境界領域が 6K という極低温においても高速で動き回る様子がとらえられた。これは整合度 2 の CDW 系で理論的に予測されていた高移動度ソリトンを実空間で初めて観測したものである。

Ge または Si(111) 表面上 Pb または Sn 蒸着 $\alpha - \sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 表面の 3 × 3 相転移 Ge または Si の (111) 表面上に 1/3 原子層の Pb または Sn を蒸着・加熱再構成させると 2 次元金属系である $\alpha - \sqrt{3} \times \sqrt{3}$ が作られる。これらの系は Sn/Si 系を除いて報告がある低温における 3 × 3 相転移に関連し、表面物理のコミュニティで最も盛んに研究が行われている。すなわち、STM による研究からは 3 × 3 低温相での占有・非占有状態の間で明暗の反転が報告され、電荷密度の秩序を伴った CDW 転移が示唆された一方、内殻準位光電子分光の研究からは Si(001) 清浄表面上で見られる $p(2 \times 1)$ (室温) → $c(4 \times 2)$ (低温) 相転移と同様の秩序無秩序型転移が示唆され、盛んに論争が繰り広げられてきた。

本研究では、まず、相転移に伴う系の電子状態変化に注目し、Pb/Ge あるいは Sn/Ge 系を用いて室温から転移温度を挟んで低温まで、走査トンネル分光、及び、 μ -4 端子法による表面電気伝導度測定を行った。その結果、系は $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 室温相、3 × 3 低温相の両方において金属的であることがわかった。この事実は金属絶縁体転移である CDW 転移モデルと矛盾する。

さらにこれらの系のフェルミ面を上述のマッピング装置を用いて探った。その結果、これらの表面のフェルミ面はわずかな nesting 条件を満たすものの、その nesting vector は 3 × 3 周期のものからはずれていることがわかった。そして、フェルミ面は室温においても 3 × 3 周期を示すことが見いだされた。すなわち、これらの系の電子状態は室温においても本質的に 3 × 3 周期に従っていることがわかった。

以上の事実から、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3} \rightarrow 3 \times 3$ 相転移は、系の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ことが明確に示された。

ここで唯一の例外は Sn/Si 系である。本研究におけるフェルミ面マッピングでは電子状態はやはり 3 × 3 周期に従うことが示されたが、一方で 6K までの STM 観察では何らの相転移が観測されなかった。過去の内殻準位光電子分光研究と併せ、この系に関しては、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 周期の格子の上を 3 × 3 周期の電荷が揺らぐ “valence charge fluctuation” モデルが支持された。

以上、本研究では、半導体表面上の 1 次元、2 次元金属系を用いて、そこで発現する相転移と系の低次元性の関連を調べた。1 次元金属系である Si(111)-4 × 1-In 系の相転移に関しては、低次

元系固有のパイエルズ転移であることが明確に示され、その素励起まで観測されたが、逆に、2次元金属系である Ge,Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb,Sn 系の相転移についてはその可能性が否定された。

最後に、表面系における低次元相転移の発現について考えてみたい。本研究においては、Pb/Ge(111)表面上に上述の2次元金属系 ($\alpha - \sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 系) とは別の2次元金属系 ($\beta - \sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 系) を作り、その電子状態も探った。その結果、この表面のフェルミ面はほぼ完全な正六角形の形状を示した。このようなフェルミ面を持つ2次元系は、通常の nearly free electron のモデルからは確実にパイエルズ転移の発現が期待される。それにもかかわらず、極低温 STM 観察からは何らの相転移が観測されなかった。この系に限らず、Au/Si(553) 1次元金属表面で相転移が観測されないなど、表面では擬低次元3次元固体に比べ低次元相転移の報告は圧倒的に少ない。

その一つの可能性としては電荷 - 格子の locking 効果の影響が考えられる。この効果は nearly free electron モデルで Lindhard 応答関数を求める際の Hamiltonian には含まれない。電荷密度波状態に至ったときの格子との整合性が悪いとき、そのエネルギー損失により相転移が妨げられる可能性がある。一方、擬低次元3次元固体においては、3次元的な広がりのため、電荷 - 電荷の locking の効果が表面に比べ大きい。そのため、電荷 - 電荷の locking 効果が電荷 - 格子の locking 効果を打ち消し、表面に比べ低次元相転移が発現しやすいと考えられる。