

## 論文内容の要旨

論文題目 表面超構造および超薄膜での局在・非局在電子輸送  
(Localized and Extended Electronic Transports at Surface Superstructures and  
Ultrathin Films)

氏名 山崎 詩郎

70年代から金属薄膜を用いた電気伝導の研究が広く行われ、金属伝導、弱局在状態の伝導、ホッピング伝導などの電気伝導理論に基づく解析が数多く行われてきた。一方90年代から原子スケールの2次元系である表面超構造の伝導の測定がなされるようになってきたが、下地の寄与のために純粋な表面超構造の電気伝導を得るのが困難であり薄膜と同様な解析は行われていなかった。本研究の目的は、表面超構造の電気伝導を測定していることを明らかにすること、および表面超構造の電気伝導をSTMから得られる欠陥や光電子分光から得られる電子状態で説明することである。その目的のために電気伝導度の温度依存性を測定することができる温度可変型マイクロ4端子法を用いて、下地の寄与のなくなる10K程度の低温領域における電気伝導度とその温度依存性を精密に測定した。また電子回折法、STMや光電子分光を用いて表面超構造の原子構造、欠陥の状態や電子状態を調べた。

Au/Si(111)表面超構造として $5 \times 2$ 、 $\alpha\text{-}\sqrt{3}$ 、 $\beta\text{-}\sqrt{3}$ 、 $\sqrt{21}$ 、 $6 \times 6$ 、 $1 \times 1$ の2D電気伝導度の温度依存性の測定を行った。その結果それぞれの表面超構造が形成された表面はまったく異なった2D電気伝導度の値とその温度依存性を示すことがわかった。また、蒸着量やアニールの方法を変えても同じ表面超構造が形成されていれば等しい2D電気伝導度の温度依存性を示すことを確かめた。またそれらの高い再現性を確かめた。これにより、測定される2D電気伝導度の温度依存性が表面に形成されている表面超構造によって決ま

っていることを初めて体系的に明らかにした。

$\beta\text{-}\sqrt{3}$  に対しては下地の基板を変えても低温では 2D 電気伝導度の温度依存性が変わらず、それらは弱局在やホッピング伝導の電気伝導度の温度依存性で説明することができた。これにより表面超構造の電気伝導を測定していることとそれらに既存の電気伝導の理論が適用できることを初めて明らかにした。一方  $\alpha\text{-}\sqrt{3}$  に対しては下地の基板依存性が極めて大きいことと低温で電気伝導が非常に小さくなることから測定された電気伝導は表面超構造のものとは考えにくい。これらから、10K 程度の低温で数  $\mu\text{S}$  以上の 2D 電気伝導度を持ち、温度依存性が弱局在から強局在へのトランジットの領域にある表面超構造であれば、表面超構造の電気伝導の測定していることを明らかにした。これにより、表面超構造の電気伝導と表面超構造の原子構造や電子状態や欠陥の関係を直接比較する研究に道が開かれた。

様々な表面超構造と超薄膜の電気伝導の値を比較することで、表面超構造の高い 2D 電気伝導度は表面全体での連続性のよさによるものであることを明らかにした。このような一原子層の連続的な表面はこれまでの膜では作製が困難であった。電気伝導度の温度依存性から高い電気伝導度はフェルミエネルギー近傍の局在電子状態の存在によるものであることを明らかにした。これらのいずれかが欠ければ 2D 電気伝導度は数桁小さくなることを明らかにした。

$\alpha\text{-}\sqrt{3}$  は  $\sqrt{3}\text{-Au}$  表面超構造に In を 0.4ML ほど室温蒸着させると新しい  $\alpha\text{-}\sqrt{3}$  は  $\sqrt{3}\text{-(Au, In)}$  表面超構造が形成される。さらに数秒アニーリングを行うとドメインウォールの消失した  $\sqrt{3}$  は  $\sqrt{3}\text{-(Au, In)}$  表面超構造が形成されることが STM を用いた研究から報告されている。これらの表面の 2D 電気伝導度を低温で測定したところ、 $\sqrt{3}\text{-(Au, In)}$  表面超構造は  $\alpha\text{-}\sqrt{3}\text{-(Au, In)}$  より高い電気伝導度を持ち、その変化は STM から観察される DW または In アイランドの消失によって説明できることを明らかにした。これにより、STM により直接実空間で調べられる 2次元単原子層の欠陥の有無と電気伝導の値の変化を初めて結びつけられた。

In/Si(111) の様々な表面超構造  $\sqrt{3}$ 、 $\sqrt{3}1$ 、 $4\times 1$ 、”2ML-In 膜”、 $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$ 、様々な欠陥を含んだ  $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$  の 2D 電気伝導度の温度依存性を測定した。低温における振る舞いから  $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$  および様々な欠陥を含んだ  $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$  について表面超構造の電気伝導を測定していることが明らかになった。 $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$  表面超構造は 10K の低温まで 2D 抵抗率が温度に比例する金属伝導を示した。これは金属伝導を示す 2次元単原子系の発見であり、これは表面超構造の中でも非常に高い電気伝導度を持っていることが予想されている  $\sqrt{7}\times\sqrt{3}$  表面超構造を用いること初めて可能になったことであり、光電子分光から得られる 2次元自由電子状態によって金属伝導を定量的に説明した。また温度依存性からデバイ温度

が 30K 程度以下であり、電子格子結合定数が 1.2 と物理的に妥当な範囲に求まった。この表面に対して 100L の O<sub>2</sub> を暴露した表面、意図的に少ない In の量で作製した表面、スポット強度の弱い表面はすべて半導体的な温度依存性を示し、10K における 2D 抵抗率は金属的な  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  表面超構造に比べて数桁上昇した。これにより、外部から詳細に観察可能な一原子層の表面において金属的から半導体的に連続的に変化する 2次元系導電体が初めて見出された。

以上から、本研究の目的である、表面超構造の電気伝導を測定していることの証明、および乱れや電子状態によって表面超構造の電気伝導を説明することが達成された。今後は、まず表面超構造の電気伝導を測れていることを電気伝導測定から確かめ、そのうえで STM による欠陥の観察を合わせた体系的な研究が望まれる。また、一原子層においても低温における電気伝導度の温度依存性が既存の理論で説明できることが明らかになった。これは通常の振る舞いを逸脱した新規の現象や相転移を発見する足がかりになると期待される。

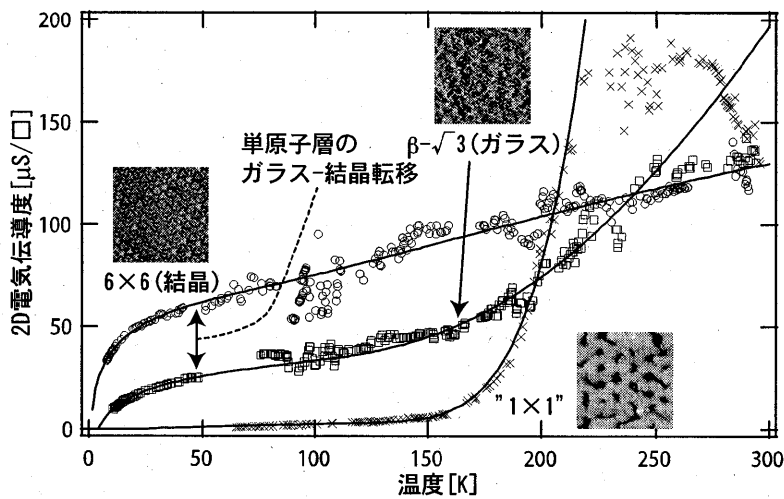


図 1. 6x6(結晶),  $\beta\text{-}\sqrt{3}$ (ガラス), "1x1" の 2D 電気抵抗度の温度依存性。ガラス結晶転移によって 2D 電気伝導度が変化している。

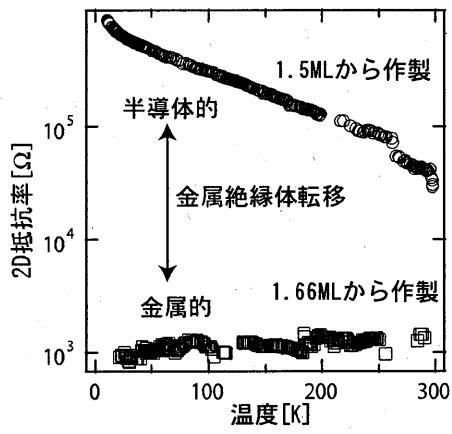


図 2.  $\sqrt{7} \times \sqrt{3}$  の 2D 電気伝導度。In のわずかな蒸着量の違いによって金属絶縁体転移が起こっている。